

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Teemu Pohjola

**VIRRANRAJOITUSKURISTIMIEN KÄYTTÖ HELSINGIN  
ENERGIAN 110 kV:n SIIRTOVERKOSSA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 2005

Työn valvoja

Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Markku Hyvärinen

Tekijä:	Teemu Pohjola
Työn nimi:	Virranrajoituskuristimien käyttö Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkossa
Sivumäärä:	107 + 12
Päivämäärä:	25. tammikuuta 2005
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professori:	S - 18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka
Työn valvoja:	Professori Matti Lehtonen
Työn ohjaaja:	Diplomi-insinööri Markku Hyvärinen
<p>Helsingissä siirtoverkko koostuu useista silmukoista, joissa kaapeleita ja avojohtoja on rinnankytkettyinä. Tällainen verkko kuormittuu epätasaisesti mm. kaapeleiden ja avojohtojen impedanssierojen seurauksena.</p> <p>Siirtoverkon toiminnassa tulee olla huomioitu mahdolliset huolto- ja vikatilanteet sekä tuotannon ja kulutuksen vaihtelut, joita verkossa voi esiintyä. Tietyissä tuotanto- ja kuormitustilanteissa on vaarana, että kaapeli Viikinmäestä Suvilahteen ylikuormittuu, vaikka rinnakkaiset avojohdot ovat pienessä kuormassa.</p> <p>Ylikuormitusongelman poistamiseksi on kaapelille Viikinmäki-Pasila suunniteltu virranrajoituskuristimien asentamista. Kuristimet rajoittaisivat kaapelin virtaa ja teho ohjautuisi enemmän avojohdoille. Työn tarkoituksena on selvittää kuristinasennuksen toimintaedellytykset ja vaihtoehdot Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkossa. Toimintaedellytyksiä tarkastellaan sähkötekniset ja ympäristönäkökohdat huomioiden.</p>	
Avainsanat:	kuristin, tehonjako, siirtoverkko



HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY *Abstract of the Master's Thesis*

Author:	Teemu Pohjola
Name of the Thesis:	The Use of Current Limiting Reactors in the 110 kV Subtransmission Network of Helsinki Energy
Number of Pages:	107 + 12
Date:	25 <sup>th</sup> of January 2005
Department:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S - 18 Power Systems and High Voltage Engineering
Supervisor:	Matti Lehtonen, Professor
Instructor:	Markku Hyvärinen, M. Sc.
<p>The subtransmission network in Helsinki is meshed, and cables and overhead lines are parallel. This kind of network strains unequally because impedances between the cables and the overhead lines are different.</p> <p>All possible maintenance and fault situations must be observed in the operation of the transmission network. Also all existing variations in production and loads must be noticed in the network. It is possible in certain production and load situations that cable is overloaded, although parallel overhead lines are in a low load.</p> <p>To solve the overloading problem, the cable from Viikinmäki to Pasila is planned to be equipped with a current limiting reactor. The reactor can limit the current of the cable and more power would flow through the overhead lines. This thesis will study the options and operational preconditions for the reactors in Helsinki Energy 110 kV transmission network. The operational preconditions will be considered both from electrotechnical and environmental point of view.</p>	
Keywords:	reactor, load flow, subtransmission network

## *Alkulause*

Tämä diplomityö on tehty Helsingin Energian Verkkoinvestoinnit -yksikössä Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolle.

Työn valvojana toimi professori Matti Lehtonen ja ohjaajana DI Markku Hyvärinen. Kiitokset heille opastuksesta ja ohjauksesta työn tekemisen eri vaiheissa.

Helsingin Energia tarjosi loistavat puitteet työn tekemiselle kuten myös työhyvinvointia lisääville vapaa-ajan harrastuksille. Lisäksi työn tekemisen mahdollistivat monet alansa asiantuntijat niin Helsingin Energiasta, Teknillisestä korkeakoulusta kuin monesta muustakin yrityksestä. Kiitokset myös heille kaikille.

Erityisesti kiitokset ovat ansainneet äiti, isä sekä siskot Tanja ja Henna koko 18-vuotisen opiskelu-uran kestäneestä tukemisesta ja kannustamisesta.

Helsingissä 25.01.2005



Teemu Pohjola

## ***Sisällysluettelo***

<b>Tiivistelmät .....</b>	<b>II</b>
<b>Alkulause .....</b>	<b>IV</b>
<b>Sisällysluettelo .....</b>	<b>V</b>
<b>Merkinnät ja lyhenteet .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Johdanto .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkko.....</b>	<b>2</b>
2.1 Rakenne.....	2
2.1.1 Taustoja kaapeliverkon kehitykselle kaupungeissa .....	3
2.2 Siirtoyhteydet .....	4
2.2.1 Kaapelit .....	4
2.2.2 Avojohtot .....	5
2.3 Kuormitus .....	5
2.3.1 Kaapelit .....	7
2.3.2 Avojohtot .....	8
<b>3 Tehonohjausvaihtoehtoja.....</b>	<b>10</b>
3.1 Virranrajoituskuristin.....	13
3.2 Sarjakompensointi.....	15
3.3 FACTS (Flexible AC Transmission Systems).....	17
3.3.1 Yleistä .....	17
3.3.2 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).....	18
3.3.3 UPFC (Unified Power Flow Controller).....	21
3.4 Verkostorakenteen muutos.....	23
3.4.1 Johtojen vaihto .....	23
3.4.2 Verkon jako .....	23
3.5 Nykyinen ratkaisumalli .....	24
3.6 Vertailu .....	25



<b>4</b>	<b>Virranrajoituskuristimen mitoitus.....</b>	<b>27</b>
4.1	Kuristimen reaktanssin määrittäminen .....	27
4.1.1	Laskentatilanteet .....	27
4.1.2	Kuormitukset.....	29
4.2	Kuormitusvirta .....	32
4.3	Vikavirrat .....	32
4.4	Ylijännitteet.....	33
4.4.1	Ilmastolliset ylijännitteet.....	33
4.4.2	Kytkenäylijännitteet .....	37
4.5	Resonanssit .....	43
4.6	Stabiilisuus.....	51
4.6.1	Yleistä .....	51
4.6.2	Jännitestabiilisuus .....	51
<b>5</b>	<b>Verkostovaikutukset.....</b>	<b>56</b>
5.1	Ylijännitesuojaus.....	56
5.2	Käyttö.....	57
5.3	Jännitteenalenema .....	57
5.4	Vaikutus vikavirtaan .....	60
5.5	Häviöt.....	62
<b>6</b>	<b>Ympäristövaikutukset .....</b>	<b>64</b>
6.1	Magneettikenttä.....	64
6.1.1	Termiset vaikutukset.....	64
6.1.2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC).....	65
6.1.3	Terveydelliset vaikutukset .....	66
6.1.4	Häiriöjännitteet .....	67
6.1.5	Kiertovirrat.....	67
6.1.6	Asennusmallin vaikutus magneettikenttiin .....	68
6.2	Äänitaso .....	68
<b>7</b>	<b>Asennus.....</b>	<b>73</b>
7.1	Tukirakenteet .....	73
7.2	Maadoitukset.....	75



---

7.3	Asennuksen esisuunnittelu.....	75
8	Kustannukset.....	79
9	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	81
	Lähdeluettelo .....	83
	Haastattelut ja keskustelut.....	86
	Liitteet .....	88

## ***Merkinnät ja lyhenteet***

### **Käytetyt merkinnät**

$\alpha$	tyristorin sytytyskulma
$\alpha_{C\text{lim}}$	kapasitiivisen toiminta-alueen raja-arvosytytyskulma
$\alpha_{L\text{lim}}$	induktiivisen toiminta-alueen raja-arvosytytyskulma
$\alpha_r$	resonanssipisteen sytytyskulma
$\beta$	äänien intensiteettitaso
$\delta$	jännitteiden vaihe-ero
$\delta_0$	alkuhetken jännitteiden vaihe-ero
$\Delta U$	jännitteen muutos / jännite-ero
$\Delta U_0$	alkuhetken jännite-ero
$\varepsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys ( $\approx 8,864\text{E-}12\text{ F/m}$ )
$\mu$	väliaineen permeabiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti ( $\approx 1,257\text{E-}6\text{ N/A}^2$ )
$\mu_r$	väliaineen suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	$U_{pq}$ :n vaihekulma
$\tau$	aikavakio
$\omega$	kulmataajuus
$\Sigma I_k''$	summaoikosulkuvirta
$A$	pinta-ala
$B$	suskeptanssi / magneettivuon tiheys
$B(\alpha)$	suskeptanssi sytytyskulmalla $\alpha$
$B_C$	kondensaattoripariston susceptanssi
$B_R$	kuristimen susceptanssi
$C$	kapasitanssi
$d$	iskupaikan etäisyys johdosta
$e$	Neperin luku ( $\approx 2,71828$ )

---

$f$	taajuus
$h$	johdon korkeus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$i$	virran hetkellisarvo / salamavirran huippuarvo
$I$	virta / äänen intensiteetti
$I_0$	vertailuintensiteetti
$I_a$	avojohdon läpikulkeva virta
$I_k$	kaapelin läpikulkeva virta
$I_k''$	oikosulkuvirta
$I_{kVm}$	Viikinmäen oikosulkuvirta
$I^*$	virran kompleksikonjugaatti
$I_C$	kondensaattorin virta
$I_{\max}$	maksimivirta
$I_p$	pätövirta
$I_q$	loisvirta
$I_R$	kuristimen virta
$I_{R\max}$	kuristimen maksimi vikavirta
$k$	kerroin, joka ottaa huomioon salamavirran etenemisnopeuden purkauskanavassa
$k_p$	pätötehohäviökustannukset
$L$	induktanssi
$LA_{eq}$	melun A-painotettu keskiäänitaso
$m$	häviösähkön hinta
$M_{Rj}$	kuristimen ja johtimen keskinäisinduktanssi
$n$	kuristimen aiheuttama virran alenemakerroin
$P$	pätöteho / ääniteho
$P_h$	pätötehohäviöt

---

$Q$	loisteho
$Q_h$	loistehohäviöt
$r$	etäisyys
$R$	resistanssi
$R_1$	muuntajan ensiöpuolen oikosulkuresistanssi
$R_2'$	muuntajan toisiopuolen ensiöön redusoitu oikosulkuresistanssi
$R_a$	avojohdon resistanssi
$R_b$	taustaverkon resistanssi
$R_{Fe}$	muuntajan rautahäviöresistanssi
$R_k$	kaapelin resistanssi
$R_l'$	ensiöön redusoitu kuorman resistanssi
$R_s$	muuntajan oikosulkuresistanssi
$S$	näennäisteho
$S_{50\%}$	50 % näennäisteho
$S_{\max}$	maksiminäennäisteho
$t$	aika
$u$	jännitteen hetkellisarvo
$U$	pääjännite
$u_h$	häiriöjännite
$U_h$	jännitehäviö
$u_{ind}$	indusoituva jännite
$U_{pq}$	UPFC-laitteella säädettävä jännite
$U_{sCh}$	sarjakompensointilaitteella varustetun johdon jännitehäviö
$U_{sRh}$	sarjakuristimella varustetun johdon jännitehäviö
$U_v$	vaihejännite
$U_{v1}$	johdon alkupään jännite
$U_{v2}$	johdon loppupään jännite



$U_{V1eff}$	UPFC-laitteella säädetyn ja johdon alkupään jännitteen summa
$W_C$	piirin kapasitansseihin varautunut energia
$W_R$	kuristimeen varautunut energia
$X$	reaktanssi
$X_{\sigma 1}$	muuntajan ensiöpuolen hajareaktanssi
$X'_{\sigma 2}$	muuntajan toisiopuolen ensiöön redusoitu hajareaktanssi
$X_a$	avojohdon reaktanssi
$X_b$	taustaverkon reaktanssi
$X_C$	kondensaattorin reaktanssi / piirin kapasitanssien aiheuttama reaktanssi
$X_k$	kaapelin reaktanssi (induktiivinen)
$X_{kc}$	kaapelin reaktanssi (kapasitiivinen)
$X'_l$	ensiöön redusoitu kuorman reaktanssi
$X_L$	piirin induktanssin aiheuttama reaktanssi
$X_m$	muuntajan magnetointireaktanssi
$X_R$	kuristimen reaktanssi
$X_s$	muuntajan oikosulkureaktanssi
$Y$	admittanssi
$Y_k$	kaapelin maa-admittanssi
$Z$	impedanssi
$Z_0$	impedanssin dimension omaava vakio
$Z_{1,2,3}$	aaltoimpedanssi
$Z_a$	avojohdon impedanssi
$Z'_a$	avojohdon ja sarjakompensoinnin yhteenlaskettu impedanssi
$Z_f$	vikaimpedanssi
$Z_i$	verkon impedanssi vikapaikasta nähtynä
$Z_k$	kaapelin impedanssi
$Z'_k$	kaapelin ja kuristimen yhteenlaskettu impedanssi

$Z_w$  vaihejohtimen aaltoimpedanssi

### Käytetyt lyhenteet

Helen	Helsingin Energia
ICNIRP	Kansainvälinen ionisoimattoman säteilyn komitea (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
Scada	Käytönvalvontajärjestelmä (Supervisory Control And Data Acquisition)
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitors
UPFC	Unified Power Flow Controller
Hn	Herttoniemen sähköasema
Km	Kampin sähköasema
Kn	Kannelmäen sähköasema
Kr	Kruununhaan sähköasema
Kt	Kasarmitorin sähköasema
Lj	Laajasalon sähköasema
Mk	Mellunkylän sähköasema
MI	Meilahden sähköasema
My	Myllypuron sähköasema
Pm	Pitäjänmäen sähköasema
Ps	Pasilan sähköasema
Pv	Punavuoren sähköasema
Sa	Salmisaaren sähköasema
Sm	Suurmetsän sähköasema
Su	Suvilahden sähköasema
Ta	Tapanilan sähköasema
To	Töölön sähköasema
Vl	Vallilan sähköasema
Vm	Viikinmäen sähköasema
Vs	Vuosaaren sähköasema
Tm	Tammiston sähköasema
Vaa	Vaaralan sähköasema

## **1 Johdanto**

Vuonna 2003 energiaa siirrettiin Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkossa 6859 GWh. Tästä Helsingin paikallisen kulutuksen osuus oli 4331 GWh, mikä vastaa noin viittä prosenttia koko Suomen sähkönkulutuksesta. /27, 28/

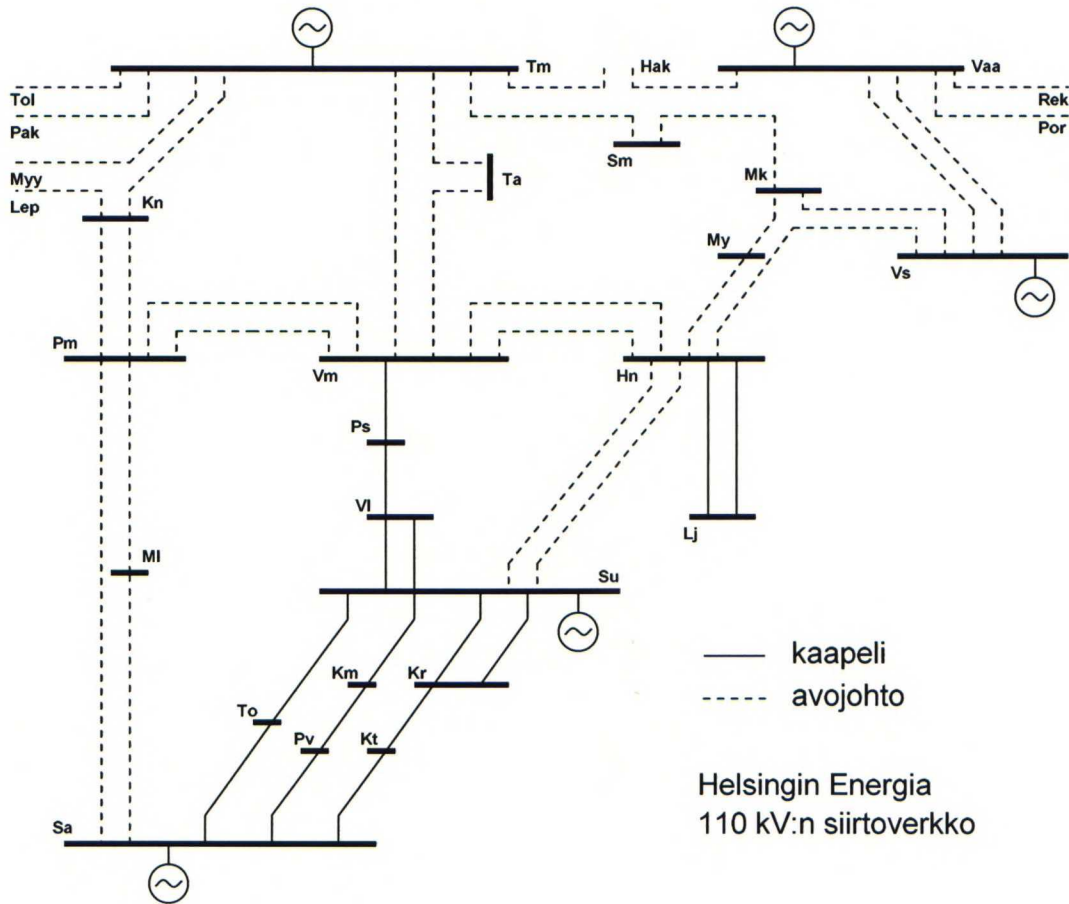
Sähkönsiirto siirtoverkossa tapahtuu kaapeleita ja avojohtoja pitkin. Siirtoverkko on voimakkaasti silmukoitu, jonka seurauksena avojohtoja ja kaapeleita on verkossa rinnankytkettyinä. Tyypillisesti kaapelin impedanssi on avojohtoa pienempi. Tästä johtuen 1970-luvulla rakennetulla kaapeliyhteydellä Viikinmäestä Suvilahteen on verkon kuormituksen kasvettua ollut taipumus ylikuormittua tietyissä tuotanto- ja kulutustilanteissa. Ongelma tulee selvimmin esille, kun siirrettävät tehot ovat suuria ja samalla jokin rinnakkaisista yhteyksistä on poissa käytöstä. Avojohtojen siirtokyky riittäisi yksistään koko tehon siirtoon, mutta kaapeliyhteys halutaan pitää käytössä käyttövarmuuden säilyttämiseksi. /1/

Työssä on tarkoituksena selvittää virranrajoituskuristimen soveltuvuus ongelman ratkaisuun sekä sen aiheuttamia vaikutuksia muuhun verkkoon ja ympäristöön. Työssä tullaan miettimään hieman myös muita mahdollisia toimenpiteitä, joilla voidaan tästä ylikuormittumisongelmasta päästä eroon toimintavarmuuden kuitenkin siitä kärsimättä.

## 2 Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkko

### 2.1 Rakenne

Helsingin Energian siirtoverkon nimellisjännite on 110 kV. Verkko koostuu avojohdoista ja keskusta-alueen kaapeleista. Siirtoverkko muodostaa rengasverkon ja tunnusomaisesti sille ovat lyhyet kaksoisavojohdot. Kuvassa 2.1 on esitetty 110 kV:n siirtoverkon kaaviokuva. Käyttömaadoitus on toteutettu suurireaktanssisilla kuristimilla /22/, jotka sijaitsevat voimalaitoksien ja kantaverkkoon liittyvien kytkinlaitosten yhteydessä. Maadoitustavaltaan tällaista verkkoa kutsutaan osittain maadoitetuksi verkoksi. Siirtoverkko syöttää kahtakymmentä sähköasemaa, joiden yhteenlaskettu nimellinen muuntoteho on 1524 MVA. Sähköasemilla siirtoverkon jännite muunnetaan keskijänniteverkon jakelujännitteeksi, kantakaupungissa 10 kV ja esikaupunkialueella 20 kV.



**Kuva 2.1.** Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkko.



Tunnusomaista Helsingin Energian siirtoverkolle on myös voimalaitosten läheisyys, mistä seuraa suuret oikosulkuvirta-arvot /22/. Voimalaitokset sijaitsevat Vuosaarella (sähkön tuotantoteho 630 MW), Hanasaarella (220 MW) ja Salmisaarella (160 MW). Lisäksi Helsingin Energialla on varavoimalaitos Kellosaarella (118 MW). /25/

Helsingin Energian siirtoverkolla on kiinteä yhteys Vantaan 110 kV:n verkkoon sekä yhteydet Porvoon suuntaan. Yhteyttä Espoon suuntaan pidetään auki /22/. Tehon syöttö suurjänniteverkkoon tapahtuu omien voimalaitoksien ja 400 kV:n sähköasemien kautta. Kantaverkkoon yhteydet ovat Tammiston ja Vaaralan sähköasemilta /26/.

### 2.1.1 Taustoja kaapeliverkon kehitykselle kaupungeissa

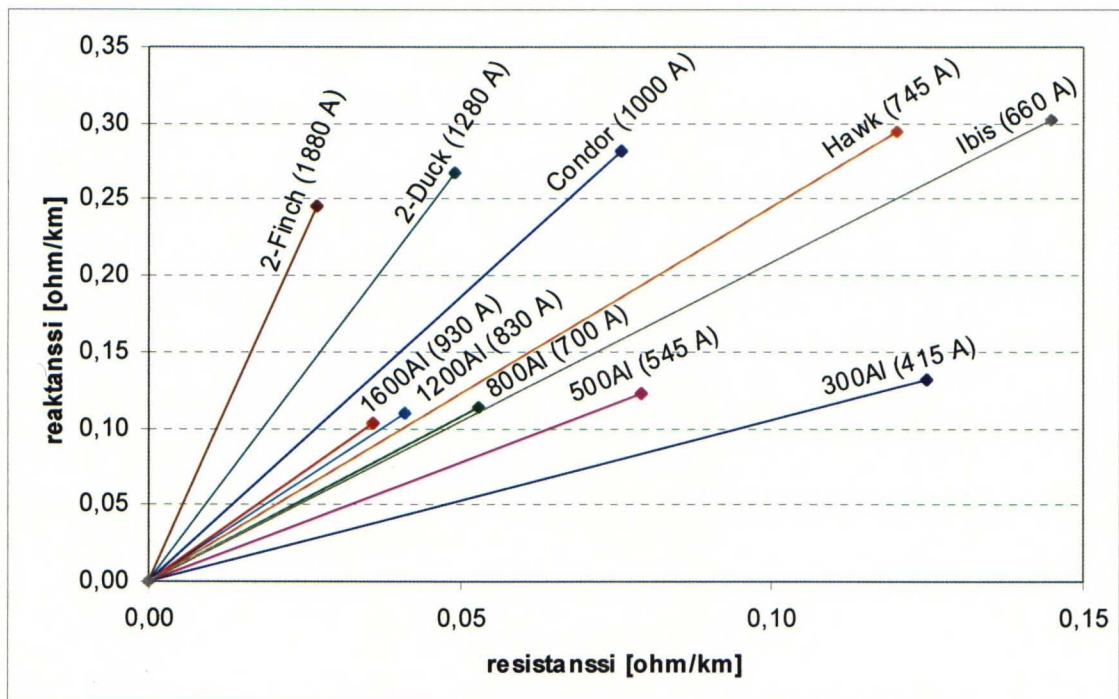
Sähkönsiirto toteutetaan kaupunkiolosuhteissa osittain kaapeliverkon avulla. Kaapeleiden kehitys on ollut jatkuvaa niin eristysominaisuuksien kuin poikkipinta-alojen osalta.

Suurin muutos on ollut eristysominaisuuksissa: öljypaperieristeisistä kaapeleista on aluksi siirrytty polyeteenieristeisiin ja myöhemmin ominaisuuksiltaan parempiin sekä edullisempiin PEX -eristeisiin kaapeleihin. Uusilla eristysmateriaaleilla on päästy pienempiin häviöihin ja ohuempiin eristyspaksuuksiin, mikä mahdollistaa kaapeleiden suuremmat poikkipinta-alat. Suurimmat poikkipinta-alat Suomessa 110 kV:n jännite-  
tasossa ovat  $1200 \text{ mm}^2$ . Olemassa on myös jo  $2500 \text{ mm}^2$  kaapeleita. Kuormitettavuus ei kaapelin poikkipinnan pysyessä samana eristysmateriaalien muuttuessa ole oleellisesti parantunut, koska rajoittimena toimii eristeen lämpötila. Eristeestä ympäröivään maa-ainekseen johtuva lämpö lämmittää maa-ainesta, jolloin sen kosteus muuttuu. Vikakes-  
toisuus on sitä vastoin parantunut eristeen kestävydestä johtuen.

Kaapeliverkkojen jännitetasot ovat myös nousseet. Aikaisemmin kaapelointia ovat rajoittaneet kaapeleiden nimellisjännitteet, esimerkiksi Helsingissä 1930-luvulta 1960-luvulle kaapeloinnin jännitetaso oli 35 kV /31/. Tällä hetkellä tyypillinen jännitetaso kaapeloinnissa suurjännitteellä on 110 kV, jota alettiin Helsingissä rakentaa 1960-luvulta lähtien, aluksi öljypaperieristeisillä ja 80-luvulta lähtien muovieristeisillä kaapeleilla /31/. Euroopassa on jo käytössä PEX -eristeisiä maakaapeleita, joiden nimellisjännite on 400 kV.

## 2.2 Siirtoyhteydet

Helsingin Energian siirtoverkon kokonaispituus on n. 170 km, josta 30 % on kaapeleita ja loput avojohtoa. /26/ Kuvassa 2.2 on esitetty 110 kV alumiinikaapeleiden ja muutaman tyypillisen avojohtotyypin resistanssi ja reaktanssiarvoja sekä niiden maksimikuormitusvirtoja. Kaapeleiden arvot ovat johtimen lämmössä 65 °C kolmioon asennettuna ja kosketussuojapiiri on avoinna tilanteen mukaisia. Vastaavasti avojohtojen arvot vastaavat tilannetta, jossa ilman lämpötila on 20 °C, johtimen lämpötila 80 °C, tuuli 0,6 m/s, johtimen pinta tummunut ( $E = 0,7$ ) ja auringonsäteily 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Kuva 2.2.** Kaapeleiden ja avojohtojen impedanssiarvoja ja kuormitettavuuksia.

### 2.2.1 Kaapelit

Helsingin Energian 110 kV siirtoverkon kaapeleista 57 prosenttia on PEX-eristeisiä ja loput öljypaperieristeisiä. Taulukkoon 2.1 on listattu verkossa esiintyvät kaapelilajit ja niiden pituudet.

Kaapelin kuormitettavuuden rajoittaa eristyksen lämmönkestävyys. Kun kaapelin läpi johdetaan virtaa, aiheuttaa se johtimen resistansseissa häviöitä, jotka lämmittävät sitä. Kuormitettavuuden kriteerinä käytetäänkin kuormitusvirtaa, jonka perustana ovat kaape-



livalmistajan ilmoittamat kuormitettavuusarvot. Joskus johtoyhteyden kuormitettavuuden määrää joku muu komponentti kuin itse johdin, esimerkiksi virtamuuntaja. /26/

**Taulukko 2.1.** Kaapeleiden pituustiedot.

	pituus [km]
<b>öljypaperi</b>	19,4
Cu 185	1,4
Cu 300	11,4
Cu 400	6,6
<b>PEX</b>	26,0
Al 300	10,7
Al 800	15,3
<b>yhteensä</b>	45,4

### 2.2.2 Avojohtot

Avojohtoilla kuumeneminen ei ole niin kriittistä kuin kaapeleilla, koska johtimia jäähdyttävä ilma vaihtuu jatkuvasti. Avojohtojen impedanssit ovat kuitenkin kaapelia suurempia. Avojohtoja puoltaa niiden edullisuus tehonsiirtokykyyn nähden /26/. Huonona puolena voidaan pitää maisemahaittoja, tosin maisemapylväillä tähänkin voidaan vaikuttaa (esimerkkinä Salmisaari - Meilahti välinen vuonna 2003 uusittu avojohtoyhteys). Taulukossa 2.2 on esitetty avojohtoverkossa käytetyt kaapelit ja niiden pituudet.

**Taulukko 2.2.** Avojohtojen pituustiedot.

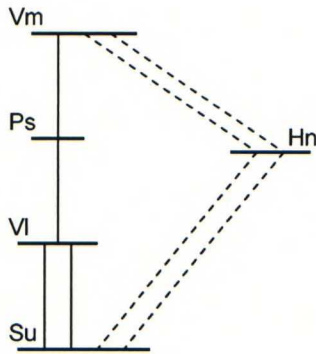
	pituus [km]
Ibis	19,2
2-Duck	86,7
2-Finch	28,4
<b>yhteensä</b>	134,3

## 2.3 Kuormitus

Kuormituksen kriteerinä pidetään, helpon mitattavuuden johdosta, kuormitusvirtaa. Luvuissa 2.3.1 ja 2.3.2 on käytönvalvontajärjestelmästä saatujen virtamittaustietojen pohjalta piirretty johdon nimellisvirralla suhteutetut virran pysyvyyskäyrät, joiden avulla saadaan tietoa tämän hetkisistä kaapelien ja avojohtojen kuormituksista. Virtatiedot ovat vuodelta 2003.

Helsingin Energian siirtoverkko on mitoitettu N-1 kriteerin mukaisesti, mikä tarkoittaa sitä, että missään verkon toimintatilanteissa sähkönsiirto ei saa vaarantua yksittäisen vian seurauksena. Järjestelmän tulee pysyä stabiilina myös erittäin vakavassa viassa kaikkein vaikeimmassa käyttötilanteessa. Laskelmissa ei oteta huomioon vian ja käyttötilanteen todennäköisyyttä /23/. Suunnitellut huollot eivät poista N-1 kriteerin voimassaoloa, vaan huollon aikaisen verkon on myös toteutettava samat ehdot.

Lasketaan verkon kuormittumista selventämään esimerkkinä yksinkertaistettu tilanne, jossa tehoa siirretään Viikinmäestä Suvilahteen ainoastaan kaapelireittiä Vm-Ps-VI-Su ja avojohtoyhteyttä Vm-Hn-Su pitkin (kuva 2.3).



**Kuva 2.3.** 110 kV verkon osa esimerkkiä varten.

Kaapeliyhteyden impedanssi on

$$Z_{k\_Vm-Su} = (0,445 + 0,832j)\Omega$$

ja rinnakkaisen kaksoisavojohtoyhteyden impedanssi on

$$Z_{a\_Vm-Su} = (0,250 + 1,440j)\Omega.$$

Virta  $I$  kulkee systeemin läpi ja jakautuu kaapelin sekä avojohdon välillä seuraavasti

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \underline{I}_a + \underline{I}_k \\ I_a &= 0,65I_k \end{aligned} \tag{2.1}$$

missä  $I_a$  = kaksoisavojohtoyhteyden läpikulkeva virta

$I_k$  = kaapeliyhteyden läpikulkeva virta.

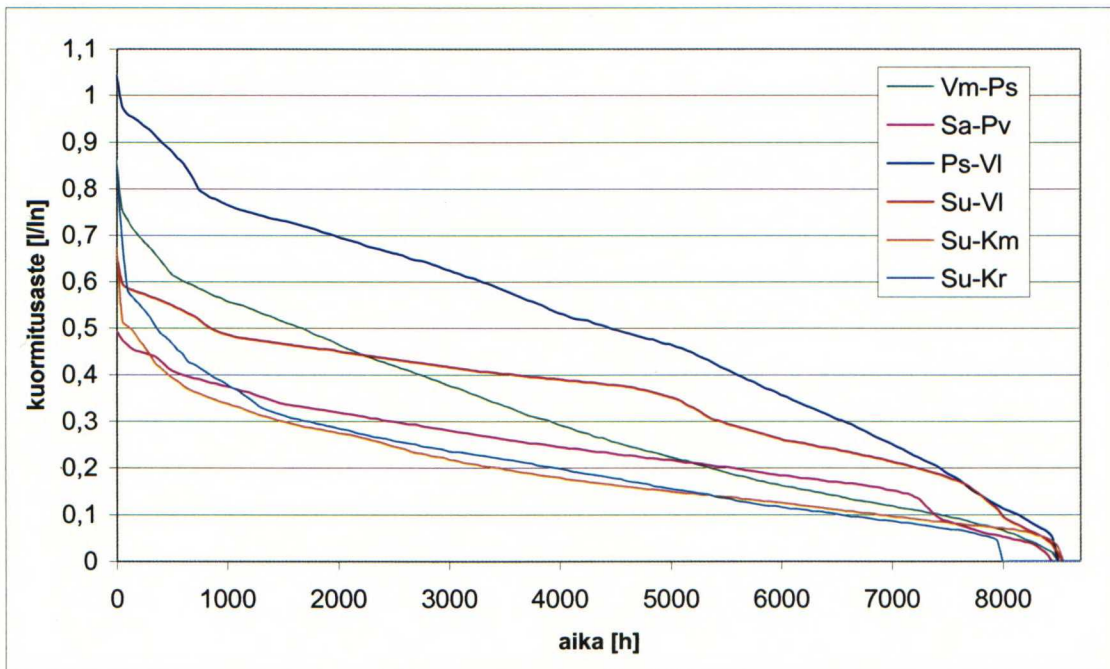


Kaapeliyhteyden läpi kulkisi tehoa yli puolet enemmän kuin rinnakkaisessa avojohtoyhteydessä, vaikka Pasilan ja Vallilan kuormituksia ei ole edes huomioitu. Kuormitettavuudet kaksoisavojohtoyhteydelle on 2400 A ja kaapeliyhteydelle 600 A. Jos kaapelin rinnalle laitettaisiin toinen kaapeli myös välille Vm-Vl, kulkisi kaapeliyhteydestä tehoa noin 2,7 -kertainen määrä avojohtoyhteyteen nähden. Kaapelireitin kuormitettavuus nousisi 1200 ampeeriin. Tuloksesta voidaan päätellä, että rinnakkaisia kaapeleita lisäämällä ei kuormittumisongelmasta päästä eroon, koska samalla reitin impedanssi putoaa. Samankaltainen vaikutus on myös sillä, jos kaapeli vaihdettaisiin paksumpaan kaapeliin.

Todellisuudessa verkkoa ei voida käsitellä esimerkin kaltaisena muista yhteyksistä riippumattomana palana. Laskennalla on tarkoitus vain osoittaa kaapelin ja avojohdon rinnankytkennästä syntyvää ilmiötä. Täydellisellä verkolla suoritettut laskennat on esitetty luvussa neljä.

### 2.3.1 Kaapelit

Kuvaan 2.4 on piirretty Helsingin Energian vuoden 2003 eniten kuormitettujen 110 kV kaapelien kuormitusasteet pysyvyyskäyrinä.



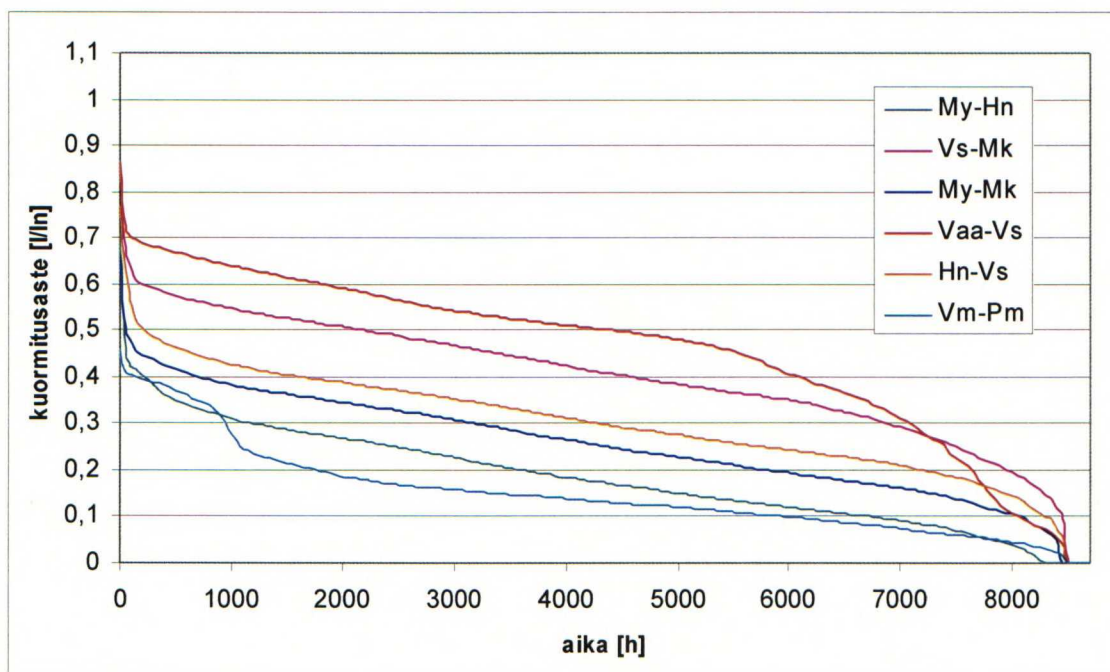
**Kuva 2.4.** Kuormitetuimpien 110 kV kaapelien pysyvyyskäyrät vuonna 2003.

Kuvasta voidaan heti nähdä, että välin Viikinmäki - Suvilahti kaapelit ovat kaikkein kuormitetuimpia. Kuormitetuin siirtoyhteys on Pasilan ja Vallilan välinen kaapeli, jonka korkeimmat suhteelliset kuormitusarvot ovat hieman yli yhden. Yli 50 %:n kuormitusasteessa kaapeli on noin 4500 tuntia vuodessa. Välin Viikinmäki - Pasila kuormitusaste on yli 50 % n. 1700 h/a ja Suvilahti - Vallila n. 900 h/a. Seuraavaksi eniten kuormitettu kaapeli oli vuonna 2003 Suvilahti - Kruununuhaka, jonka korkein suhteellinen huippu käy yli 0,8:ssa, mutta yli 50 prosentin kuormitus on enää noin 400 tuntia vuodessa.

Kuormituksista voidaan päätellä, että tehon virtaus on suurimman kuorman tilanteissa ollut keskustasta poispäin. Tämän kaltainen tilanne syntyy, kun kantakaupungin voimalaitokset ovat toiminnassa samalla, kun kuormitus on vähäistä. Vastaavasti, jos tuotanto kantakaupungissa olisi vähäistä korkean kulutuksen aikana, teho siirtyisi kantakaupunkiin päin ja kaapeli Viikinmäki - Pasila kuormittuisi eniten.

### 2.3.2 Avojohdot

Kuvaan 2.5 on piirretty Helsingin Energian vuoden 2003 eniten kuormitettujen 110 kV avojohtojen kuormitusasteet pysyvyyskäyrinä.



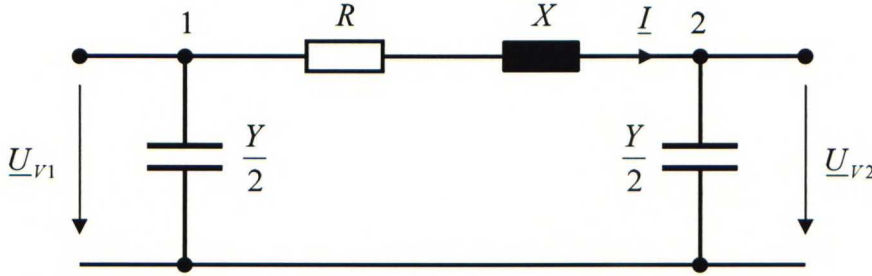
**Kuva 2.5.** Kuormitetuimpien 110 kV avojohtojen pysyvyyskäyrät vuonna 2003.

---

Eniten kuormitetut avojohdot ovat Vuosaaren voimalaitokselta poispäin johtavia johtoja. Seuraavaksi eniten kuormitettu avojohdot on kuudentena oleva Viikinmäki - Pitäjänmäki, jonka suhteellinen kuormitus pysyi vuonna 2003 kuitenkin koko ajan alle 50 %:n.

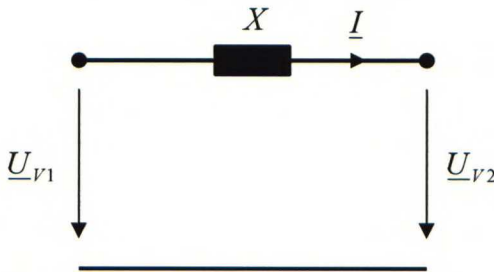
### 3 Tehonohjausvaihtoehtoja

Käsiteltäessä johdon tehonsiirtoa, on jänniteosoittimien lähempi tarkastelu tarpeen. Voimansiirtojohdolle voidaan tehdä kuvan 3.1 kaltainen  $\Pi$ -sijaiskytkentä, jossa johtojen konduktanssit on jätetty ottamatta huomioon. /2/



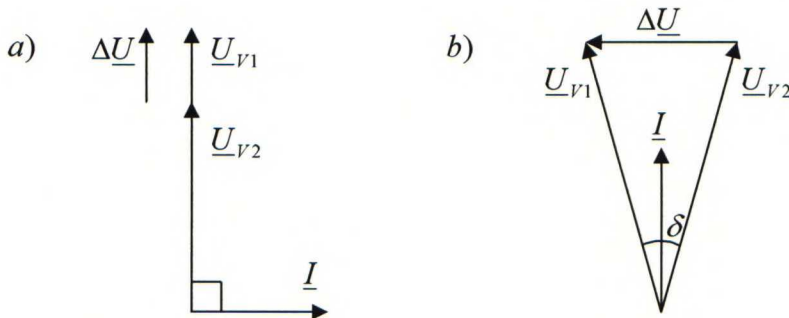
**Kuva 3.1.** Voimansiirtojohdon  $\Pi$ -sijaiskytkentä.

Lyhyillä siirtojohdoilla ( $< 100$  km) johdon rinnakkaisadmittanssit ( $Y/2$ ) ovat niin pieniä, että ne voidaan olettaa nolliksi. Suurjännitejohdoilla ( $U \geq 110$  kV) reaktanssi on määrävin tekijä (kuva 2.2). Tarkastelua voidaan tällöin yksinkertaistaa ja sijaiskytkennässä johtoa edustaa pelkkä reaktanssi (kuva 3.2). /2, 3/



**Kuva 3.2.** Suurjännitejohdon sijaiskytkentä.

Edellisen tapauksen osoitindigrammit on esitetty kuvassa 3.3.



**Kuva 3.3.** Kuvan 3.2 osoitindigrammit a) jännitteet samanvaiheiset b) jännitteet eri-vaiheiset.



Kuvasta 3.3 a) nähdään, että jännitteiden ollessa samanvaiheiset mutta erisuuruiset, siirtyy johdossa pelkästään loisvirtaa. Jännitteiden ollessa yhtä suuret ja erivaiheiset (kuva 3.3 b)), kulkee johdossa pääasiassa pätövirtaa. Pätövirtaa siirtyy siis ainoastaan, kun  $\delta \neq 0$  ja loisvirtaa kun  $U_{v1} \neq U_{v2}$ .

Tehdään seuraavat oletukset /4/

$$\underline{U}_{v1} = U_{v1} \angle 0^\circ$$

$$\underline{U}_{v2} = U_{v2} \angle -\delta.$$

Nyt voidaan kirjoittaa

$$\underline{U}_{v1} = \underline{U}_{v2} + j\underline{I}_1 \cdot X$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{v1} - \underline{U}_{v2}}{jX} = \frac{\underline{U}_{v1} - \underline{U}_{v2} \angle -\delta}{jX} \quad (3.1)$$

$$\underline{S}_1 = 3\underline{U}_{v1} \underline{I}_1^* = 3 \cdot \underline{U}_{v1} \cdot \frac{\underline{U}_{v1} - \underline{U}_{v2} \angle -\delta}{-jX}. \quad (3.2)$$

Siirrytään pääjännitteisiin

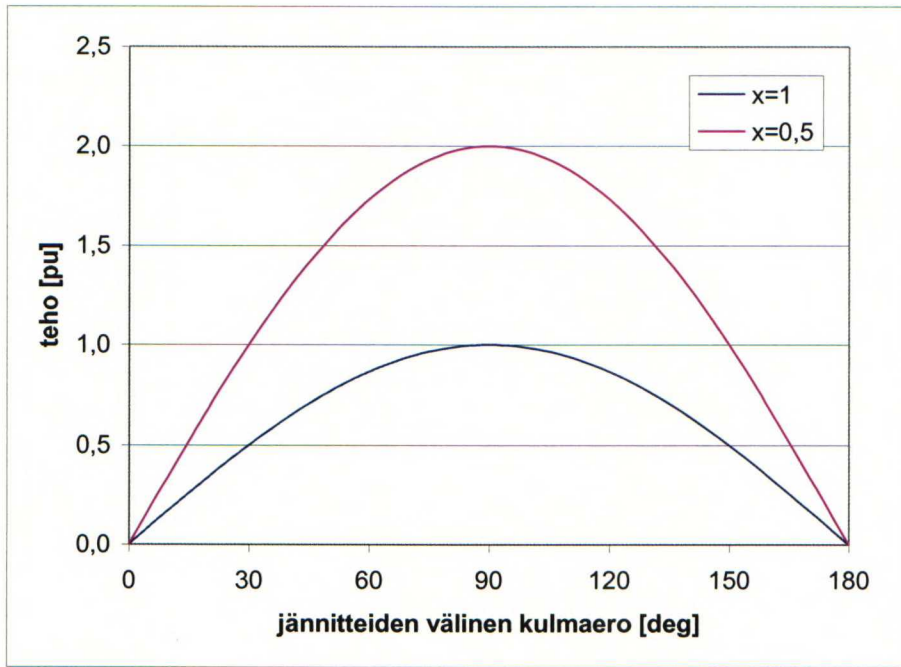
$$\underline{S}_1 = \frac{U_1^2}{-jX} + \frac{-U_1 U_2 \angle \delta}{-jX} = j \frac{U_1^2}{X} + \frac{U_1 U_2 \cos \delta + j U_1 U_2 \sin \delta}{jX} \quad (3.3)$$

$$= \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + j \left( \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta \right).$$

Tehon yhtälön reaalisaa kutsutaan ns. tehokulmayhtälöksi

$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta. \quad (3.4)$$

Tehokulmayhtälöstä voidaan havaita, että siirretyn tehon määrään voidaan vaikuttaa jännitteen  $U$ , reaktanssin  $X$  ja jännitteiden kulmaeron  $\delta$  avulla. Kuvassa 3.4 on esitetty tehokulmayhtälö graafisesti kahdella eri suhteellisella reaktanssin arvolla ( $x = 1$  ja  $x = 0,5$ ) kulmaeroilla  $0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$ .



**Kuva 3.4.** Tehokulmakäyrä kahdella eri reaktanssin  $x$  arvolla.

Kuvasta nähdään, että maksimiteho saavutetaan kulmaerolla  $90^\circ$ . Jos reaktanssi pienee puoleen, maksimi siirretty teho kasvaa kaksinkertaiseksi (käyrä  $x = 0,5$ ).

Käytännössä kahden solmupisteen välinen kulmaero on aina pieni ( $\leq 10^\circ$ ) /2/. Helsingin Energian 110 kV:n verkossa jännitteiden välillä ei normaalissa käyttötilanteessa esiinny yli  $5^\circ$ :n kulmaeroja. Kovin suureen kulmaeroon ei voida mennä erityisesti loistehorajoituksen vuoksi /2/. Jännitteiden ylläpitämiseksi halutuissa arvoissaan on johdon päistä syötettävä johtoon loisteho

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta \quad (3.5)$$

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta. \quad (3.6)$$

Kulmaerolla  $\delta = 90^\circ$  loistehot ovat

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X} \quad (3.7)$$

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{X}. \quad (3.8)$$

Loistehojen  $Q_1$  ja  $Q_2$  summa olisi jo yli kaksinkertainen oikosulkutehooon nähden.

Käytännön yläraja kulmaerolle saadaan, jos oletetaan, että alku- ja loppupäästä saatavissa olevien loistehojen summa on puolet siirrettävästä pätotehosta, ja että jännitteet alku- ja loppupäässä pidetään yhtä suurina. /2/

$$Q_1 = \frac{1}{4} P_1 \quad (3.9)$$

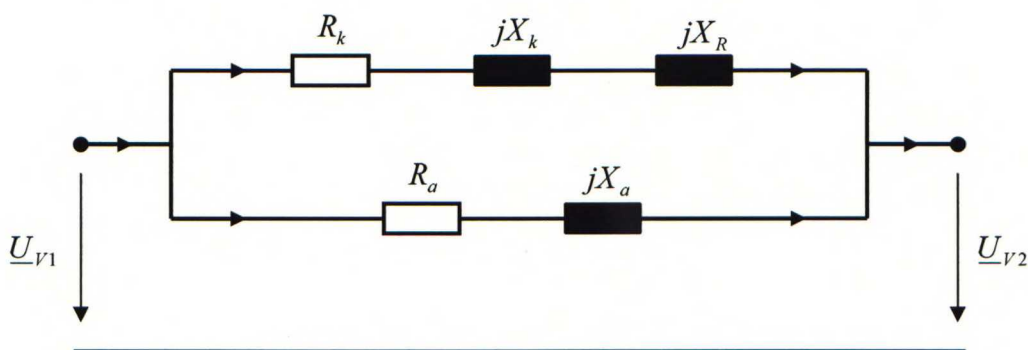
$$U_1 = U_2 \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow \sin \delta = 4(1 - \cos \delta) \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow \delta \approx 28^\circ$$

### 3.1 Virranrajoituskuristin

Virranrajoituskuristimia käytetään tyypillisesti oikosulkuvirran rajoittamiseen /21/. Helsingin Energian tilanteessa kuristimen ensisijainen tarkoitus olisi kuitenkin rajoittaa kuormitusvirtaa. Virranrajoituskuristin tulee kytkeä sen johdon kanssa sarjaan, jolla virtaa halutaan rajoittaa. Kuvassa 3.5 on esitetty tilanne, jossa kaapeli ja avojohto ovat rinnankytkettyinä. Kaapelin virtaa on rajoittamassa virranrajoituskuristin.



**Kuva 3.5.** Virranrajoituskuristin kytkettynä kaapelille, jonka rinnalla on avojohto.

Kaapelin impedanssi on

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k \quad (3.12)$$

missä  $Z_k$  = kaapelin impedanssi

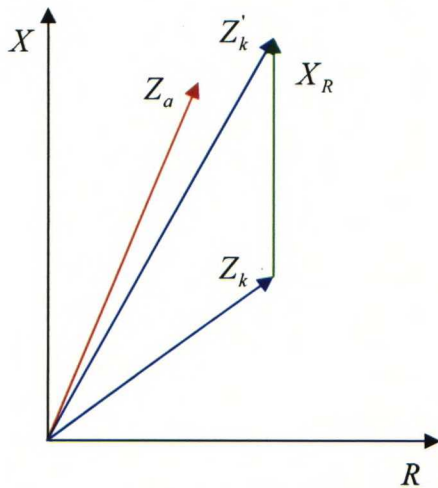
$R_k$  = kaapelin resistanssi

$X_k$  = kaapelin reaktanssi.

Lisättäessä kaapelin kanssa sarjaan kuristin saadaan impedanssiksi

$$\underline{Z}'_k = R_k + j(X_k + X_R) \quad (3.13)$$

missä  $X_R$  = kuristimen reaktanssi.



**Kuva 3.6.** Osoitindiagrammi kuvan 3.5 kytkennälle.

Kuvasta 3.6 voidaan nähdä, että kuristimen lisääminen nostaa yhteyden reaktanssia ja siten koko impedanssia. Jotta kuormitusasteet sekä kaapelilla että avojohdolla olisivat yhtä suuret, on kaapeliyhteyden impedanssi asetettava avojohdon impedanssia selvästi suuremmaksi.

Kasvattamalla kaapelireitin impedanssia kuristimen avulla, saadaan tehonjako muuttumaan siten, että virta kulkee enemmän rinnakkaisissa avojohdoissa. Samalla kaapelin kuormitus laskee.

Vaikuttamalla kaapelin reaktanssiin myös jännitehäviöt sillä muuttuvat. Jännitehäviö kaapelissa on suurimmillaan säteittäiskäytössä, jolloin se voidaan laskea seuraavasti

$$U_h \approx I_p R_k + I_q X_k \quad (3.14)$$

missä  $U_h$  = jännitteenalenema  
 $I_p$  = pätövirta  
 $I_q$  = loisvirta.



Kuristimen lisääminen aiheuttaa jännitteenmuutoksen

$$\Delta U = -I_q X_R \quad (3.15)$$

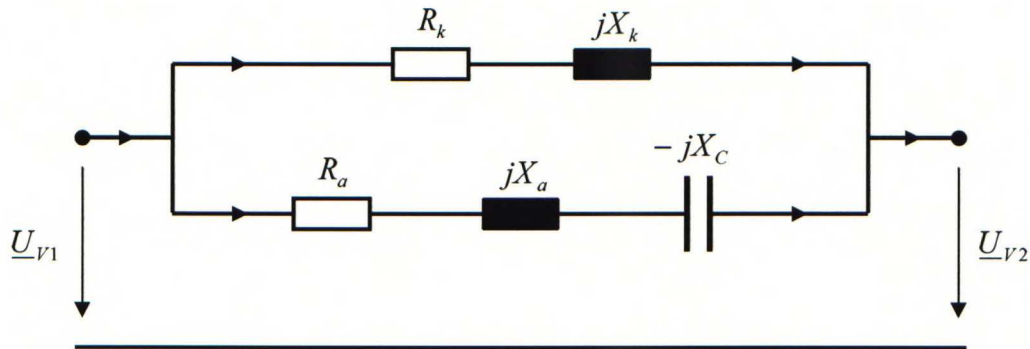
missä  $\Delta U$  = kuristimesta aiheutunut jännitteen alenema.

Sarjakuristimella varustetun kaapelin jännitehäviöksi saadaan

$$U_{sRh} = U_h - \Delta U = I_p R_k + I_q (X_k + X_R). \quad (3.16)$$

### 3.2 Sarjakompensointi

Sarjakompensoinnissa johdon reaktanssiin vaikutetaan kytkemällä kondensaattori johdon kanssa sarjaan (kuva 3.7) /6/. Kuvassa 3.7 on esitetty tilanne, jossa kaapelin kanssa rinnankytkettynä on sarjakompensoitu avojohto.



**Kuva 3.7.** Sarjakompensointi kytkettynä avojohdolle, jonka rinnalla on kaapeli.

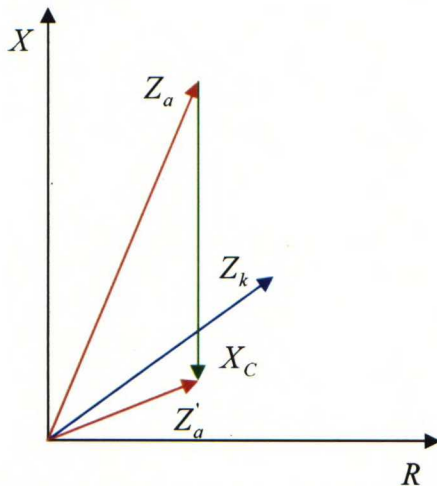
Avojohtojen impedanssi ilman kompensointia on kaavan (3.12) mukaan

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_a.$$

Lisättäessä johdon kanssa sarjaan kondensaattori saadaan impedanssiksi

$$\underline{Z}'_a = R_a + j(X_a - X_C) \quad (3.17)$$

missä  $X_C$  = kondensaattorin reaktanssi.



**Kuva 3.8.** Osoitindiagrammi kuvan 3.7 kytkennälle.

Kondensaattorin lisäämisellä pyritään, toisin kuin sarjakuristimella, laskemaan johdon impedanssia. Jos  $X_C = X_a$ , on johtimen impedanssi puhtaasti resistiivinen, joten loishäviöitä ei synny.

Kuten virranrajoituskuristimen tapauksessa, myös sarjakompensointi vaikuttaa johdolla syntyviin jännitehäviöihin, vaikutus on vain päinvastainen.

Kondensaattori lisääminen aiheuttaa säteittäissyötössä jännitteen muutoksen

$$\Delta U = I_q X_C \quad (3.18)$$

missä  $\Delta U$  = kondensaattorin vaikutus jännitteenalenemaan.

Sarjakompensoidun avojohdon jännitehäviöksi saadaan

$$U_{sch} = U_h - \Delta U = I_p R_a + I_q (X_a - X_C). \quad (3.19)$$

Sarjakondensaattoria käytettäessä muuttuu jännitteenalenema siis kuormitusvirran loiskomponentista ja kondensaattorin reaktanssista riippuvalla määrällä. Koska sarjakondensaattorilla saatava jännitteen nousu on riippuvainen kuormitusvirrasta, on saatava jännitteensäätö myös portaaton. /6/

Jos  $X_C > X_a$ , tulee johdon reaktanssi negatiiviseksi, jolloin on mahdollista pienentää myös pätötehon siirrosta aiheutuvaa jännitteen laskua /6/. Tällöin tosin johdon impedanssi lähtee jälleen kasvamaan, kuten kuvan 3.8 osoittamista voidaan päätellä.

Helsingin Energian tilanteessa sarjakondensaattorit tulisi kytkeä avojohdoille, jolloin niiden impedanssi laskisi suhteessa kaapelireittiin. Tällöin kuormitus ohjautuisi enemmän vahvoja avojohtoja pitkin, eikä kaapelireitti kuormittuisi niin paljoa.

### 3.3 *FACTS (Flexible AC Transmission Systems)*

#### 3.3.1 Yleistä

Termillä FACTS (Flexible AC Transmission Systems) viitataan kaikkiin tehoelektroniisiin laitteisiin, joita käytetään sähkönsiirtoverkon hallinnassa. FACTS-laitteet ovat tehovuolijohdekomponentteja ja tyypillistä niille on verkkosuureiden ohjattavuus, nopeus ja portaattomuus. FACTS-laitteilla pystytään vaikuttamaan yhteen tai useampaan tehokulmayhtälön 3.4 suureeseen. /5, 8/

FACTS-laitteistolla voidaan hakea mm. seuraavia hyötyjä /3/

- tehonjaon muuttaminen
- voimajärjestelmän vaimennuksen parantaminen
- transienttistabiilisuuden parantaminen
- jännitestabiilisuuden parantaminen
- aliharmonisten heilahtelujen vaimeneminen.

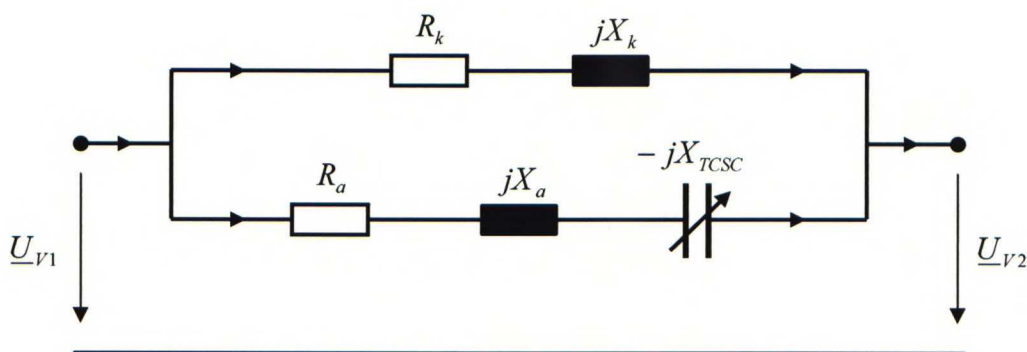
Tärkeimmät FACTS-laitteet ovat: /3, 8/

- tyristoriohjatut rinnakkaiskompensointilaitteet
  - SVC (Static Var Compensator)
  - STATCOM (Static Compensator)
- tyristoriohjatut sarjakompensointilaitteet TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)
- tyristoriohjatut vaiheenkääntölaitteet TCPR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)
- tyristoriohjatut jarrutusvastukset TCBR (Thyristor Controlled Braking Resistor)
- yhdistetyt laitteet

- UPFC (Unified Power Flow Controller)
- IPFC (Interphase Power Flow Controller).

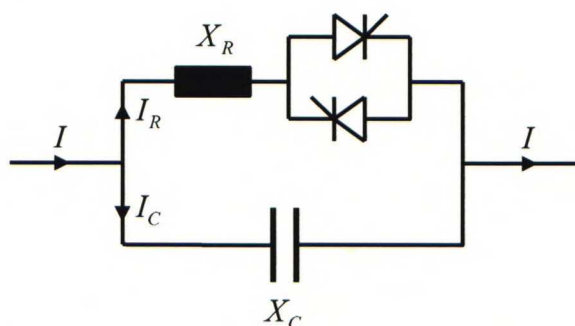
### 3.3.2 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Helsingin Energian kannalta kiinnostavin on TCSC-laite, joka on periaatteeltaan samanlainen kuin aiemmin käsitelty sarjakompensointi. Lisäksi TCSC:ssä on kondensaattorin rinnalle kytketty tyristoriohjattu kuristin loistehon säätöä varten. Kuvassa 3.9 on esitetty TCSC sijoitus johdolle sijaistykennässä. TCSC on kytketty avojohdolle, jonka rinnalla on kaapeli.



**Kuva 3.9.** TCSC-laite kytkettynä johdolle.

TCSC on siis kytketty johdon kanssa sarjaan. Kuvassa 3.10 on kuvattu TCSC-laite tarkemmin.



**Kuva 3.10.** TCSC.

TCSC:lle voidaan määrittää kolme erityyppistä toimintatilaa tyristorien toiminnan kannalta. Tyristorin ohjaussuurena on sytytyskulma  $\alpha$  [9, 10]



1. *Läpäisytila* ( $\alpha = 0^\circ$ ): Läpäisytilassa tyristori on liipaistuna jatkuvasti ja se johtaa siten jatkuvasti. Tällöin TCSC toimii rinnankytkettynä kondensaattoriparistona ja kuristimenä, jolloin virta  $I_C$  on huomattavasti virtaa  $I$  pienempi. Tilaa käytetään alentamaan kapasitanssin rasitusta vian aikana.

2. *Estotila* ( $\alpha = 90^\circ$ ): Estotilassa tyristori ei liipaistu, jolloin se ei myöskään johda. Virta  $I_R$  on tällöin nolla ja virta  $I$  kulkee kokonaisuudessaan kondensaattoripariston läpi. TCSC toimii estotilassa täysin vastaavasti kuin edellisessä luvussa kuvattu pelkkä sarjakompensointilaite.

3. *Osittain johtava tila* ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ): Osittain johtavassa tilassa on mahdollista säätää laitteen näennäissuskeptanssia  $B$  [ $S = 1/\Omega$ ] jatkuvasti induktiivisesta kapasitiiviseen, muuntelemalla tyristorin sytytyskulman  $\alpha$  arvoa.

Tyristorin suhteellinen johto-osuus voidaan lausua sytytyskulman  $\alpha$  avulla

$$\text{suhteellinen johto-osuus} = \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}. \quad (3.20)$$

TCSC-laitteen kokonaissuskeptanssiksi tällöin saadaan

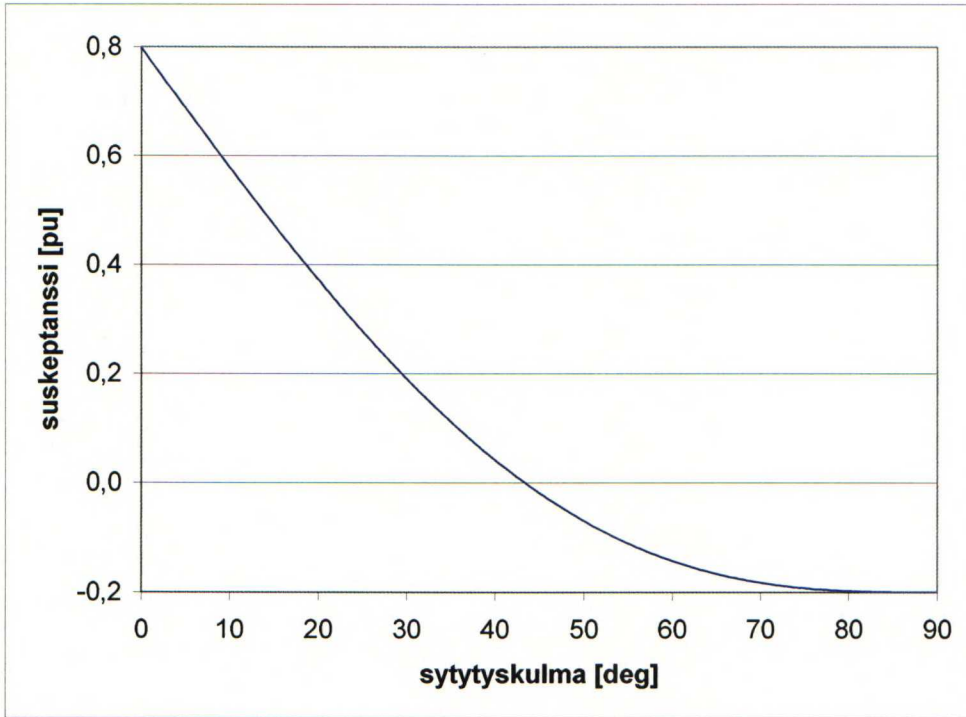
$$B(\alpha) = B_R \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \quad (3.21)$$

missä  $B(\alpha)$  = TCSC-laitteen kokonaissuskeptanssi sytytyskulmalla  $\alpha$

$B_R$  = kuristimen suskeptanssi

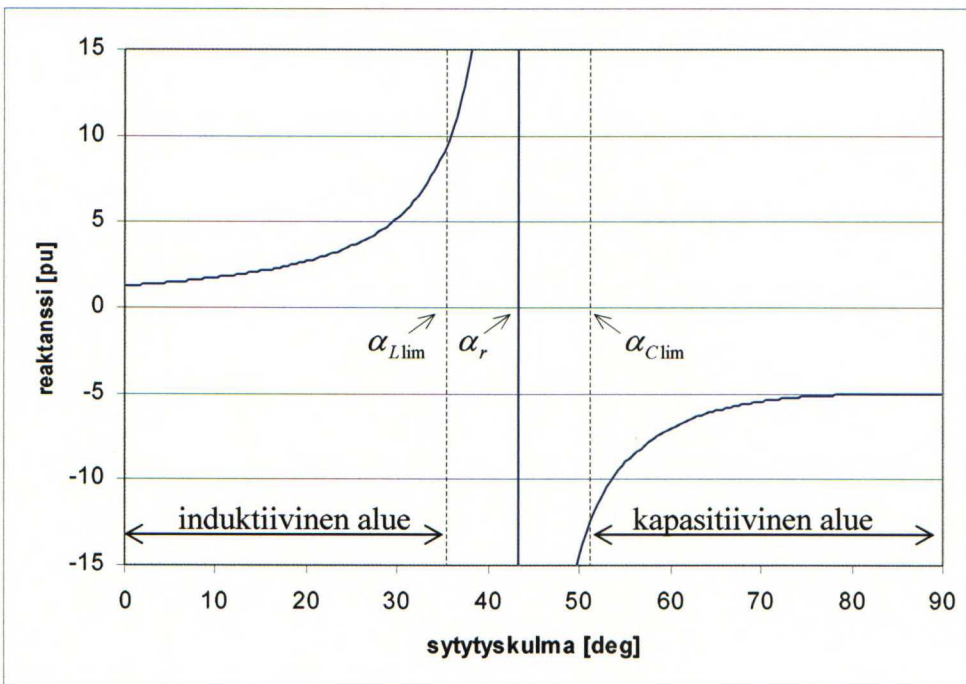
$B_C$  = kondensaattoripariston suskeptanssi.

Valitaan esimerkiksi  $B_R = 1.0$  pu ja  $B_C = -0.2$  pu. Kuvaan 3.11 on laskettu suskeptanssin  $B$  arvot sytytyskulman  $\alpha$  funktiona.



**Kuva 3.11.** TCSC:n  $B$  arvot sytytyskulman  $\alpha$  funktiona ( $B_R = 1.0$  pu,  $B_C = -0.2$  pu).

Reaktanssikäyrä  $X(\alpha)$  on käyrän  $B(\alpha)$  käänteisarvo (kuva 3.12).

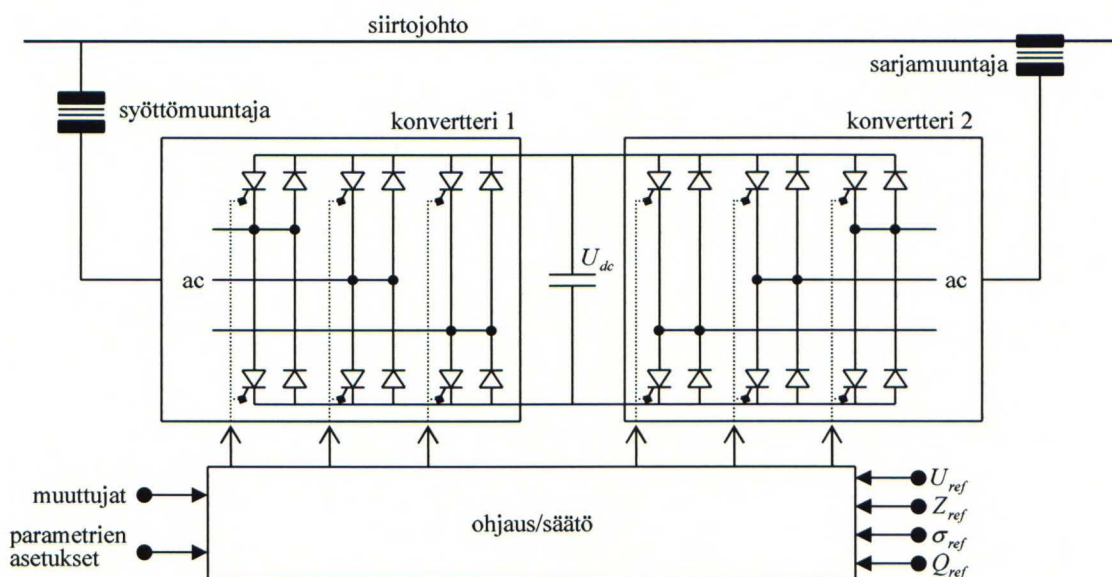


**Kuva 3.12.** TCSC:n  $X$  arvot sytytyskulman  $\alpha$  funktiona ( $B_R = 1.0$  pu,  $B_C = -0.2$  pu).

Kuvasta 3.11 voidaan nähdä resonanssipiste, jossa tyristorien johto-osuudella painotettu  $B_R = -B_C$  (nollan ylitys kohta). Kuvassa 3.12 tämä näkyy äärettömän suurena vahvistuksena. Toiminta onkin estetty resonanssipisteen sytytyskulmalla  $\alpha_r$  ja sen läheisyydessä välillä  $\alpha_{L\lim} < \alpha < \alpha_{C\lim}$ . Sytytyskulman ollessa välillä  $0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{L\lim}$  toimitaan induktiivisella- ja sytytyskulmalla  $\alpha_{C\lim} \leq \alpha \leq 90^\circ$  kapasitiivisella toimintalueella. /8, 10/

### 3.3.3 UPFC (Unified Power Flow Controller)

UPFC on suunniteltu vaihtovirrallisen siirtojärjestelmän reaaliaikaiseen säätöön ja dynaamiseen kompensoimiseen. UPFC:llä voidaan ratkaista useanlaisia tehonsiirto-ongelmia. Laitteella on mahdollista säätää samanaikaisesti tai valinnaisesti kaikkia tehokulmayhtälön 3.4 suureita (jännite, impedanssi ja vaihekulma), jolloin saadaan maksimoitua johdon hyväksikäyttö ja systeemin kapasiteetti, sekä minimoitua loistehon virtauksesta syntyvät häviöt. Usein pätötehon säätö siirtojohdolla vastaavasti muuttaa loistehoa, mutta UPFC-laitteessa molemmat ovat säädettävissä erikseen. /8, 30/

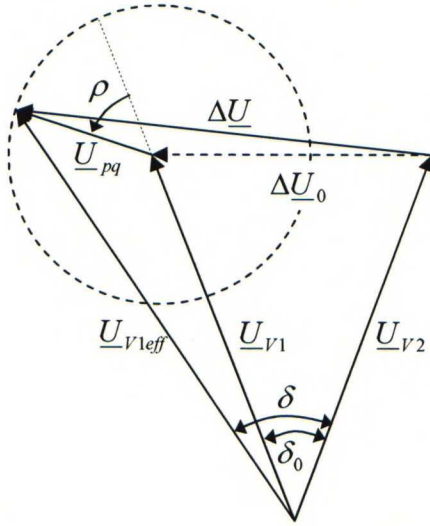


**Kuva 3.13.** UPFC-laitte kytkettynä siirtojohdolle /8/.

Tällä hetkellä maailmalla käytössä olevissa toteutuksissa UPFC sisältää kaksi jänniteohjattua konvertteria. Konverttereja ohjataan tasavirtalinkillä. Pätöteho voi vapaasti virrata molempiin suuntiin konvertterien välillä ja molemmat niistä voivat itsenäisesti tuottaa



tai absorboida loistehoa. Kuvan 3.13 konvertteri 2 mahdollistaa UPFC:n päätarkoituksen: säädettävä jännitteen suuruus  $U_{pq}$  ja sen vaihekulma  $\rho$ . Kuvassa 3.14 on esitetty UPFC:n toiminta periaatetta nuolikaavion avulla.  $U_{pq}$ :n arvot voivat vaihdella välillä  $0 \leq U_{pq} \leq U_{pq \max}$  ja kulma  $\rho$  välillä  $0 \leq \rho \leq 2\pi$ .



**Kuva 3.14.** UPFC:n osoitindiagrammi.

Helsingin Energialla UPFC:n sijoituspaikaksi voitaisiin valita sekä kaapeliyhteys Viikinmäestä Suvilahteen että vaihtoehtoisesti sen rinnalla olevat avojohtoyhteydet. Avojohtoyhteydelle asennettaessa säädettäväksi suureeksi tulisi loisteho. Tällöin teho virtaisi enemmän avojohtoja pitkin ja kaapelin kuormitus laskisi. Kaapelille asennettaessa säädettäväksi suureeksi tulisi jännitteiden välinen kulmaero. Säättämällä kulmaero sopivaksi saadaan kaapeliyhteyden läpi kulkevan virran määrä rajoitettua halutulle tasolle, ja jos säätövaraa on tarpeeksi, jopa estetyksi kokonaan.

Käytännössä asennuspaikaksi kannattaisi valita kaapelireitti, koska silloin tarvittaisiin ainoastaan yksi UPFC laitteisto. Jos sijoituspaikaksi valittaisiin avojohdot, laitteistoja tarvittaisiin neljä: yksi jokaiselle avojohtovirtapiirille.



### 3.4 Verkostorakenteen muutos

#### 3.4.1 Johtojen vaihto

Tehonjakautumiseen verkossa pystytään vaikuttamaan myös verkostorakenteen muutoksilla. Esimerkiksi nykyiset avojohtoreitit Viikinmäki - Herttoniemi - Suvilahti ja Viikinmäki - Pitäjänmäki - Meilahti - Salmisaari voitaisiin vaihtaa kaapeleiksi.

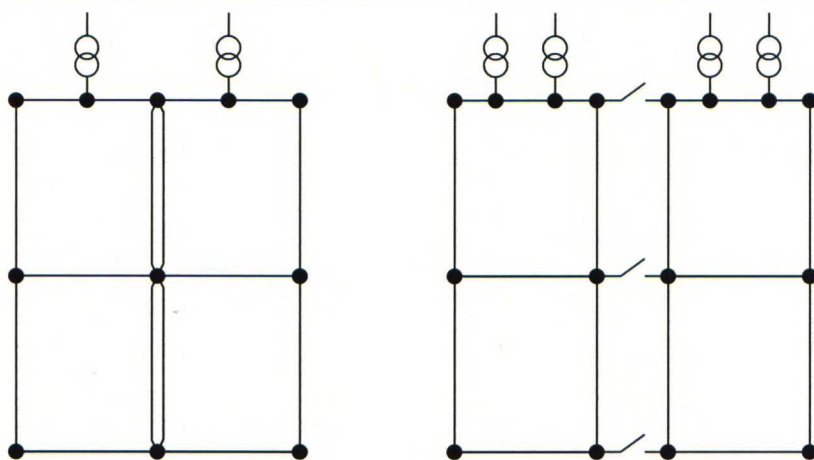
Vaihdettavien avojohtoreittien yhteispituus on noin 23 km. Muut johdot ovat 2x2Duck johtoja, paitsi väli Viikinmäki - Pitäjänmäki, joka on 2xIbis:ä. Jos vastaavan suuruinen tehonsiirtokyky kuin avojohdoilla haluttaisiin säilyttää (kuormitettavuudet: Ibis  $\approx 520$  A, 2-Duck  $\approx 1200$  A), tulee kaapelia AHXLMK800 (kuormitettavuus: AHXLMK800  $\approx 600$  A) olla neljä kappaletta rinnakkain.

Vastaavasti voitaisiin ajatella kaapelia vaihdettavaksi tietyiltä osin avojohdoksi. Käytännössä tämä olisi kuitenkin lähes mahdotonta. Myös avojohtoreittien riittävän suuri vahvistaminen saisi niiden impedanssin laskemaan niin paljon, että ongelma ratkeaisi. Tästä kuitenkin olisi seurauksena erittäin leveät johtokadut sekä avojohtojen alhainen käyttöaste.

#### 3.4.2 Verkon jako

Mahdollista olisi myös jakaa nykyinen verkko erillisiin osiin, jotka eivät normaalissa kytkentätilanteessa olisi yhteydessä toisiinsa. Kuvassa 3.15 on esitetty periaate miten esimerkin kaltainen verkko voitaisiin jakaa kahteen osaverkkoon.

Verkon jaon etuna olisi tehon jakautuminen nykyistä tasaisemmin verkon eri osissa. Edellytyksenä olisi jaettavien palojen huolellinen määrittäminen. Mahdolliseksi, ja todennäköisesti kannattavaksi, tulisi samalla muuttaa jokin yksittäinen avojohtoreitti kaapeliksi, jolloin muutoksesta saatu vaikutus olisi huomattavasti merkittävämpi osaverkossa, kuin jos verkko on kokonaisuudessaan yhdessä.



**Kuva 3.15.** Periaatekuva verkon jaosta, jossa vasemmanpuoleinen verkko on jaettu oikeanpuoleisen kaltaiseen kahteen osaan.

Jaetussa verkossa yhteyksiä 400 kV:n tasoon olisi lisättävä, jotta käyttövarmuus säilyisi riittävän korkeana. Jos verkossa olisi ainoastaan yksi ylemmän jännitetason yhteys, sen vikaantuessa koko osaverkon virransyöttö katkeaa, kunnes yhteydet viereiseen verkkoon saadaan toimimaan tai vikaantunut yhteys korjattua. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että jaettaessa verkko kahteen osaan tulisi 400 kV:n yhteyksiä lisätä nykyisestä kahdesta neljään. Merkittäväksi tulisi myös voimalaitoksien sijoittuminen jaetuissa verkoissa. Esimerkiksi Vuosaaren voimalaitoksen suuri sähköntuotantokapasiteetti saattaisi johtaa tilanteeseen, jossa osa sähköstä olisi pakko siirtää kantaverkkoon, vaikka toisessa osaverkossa olisi tuotantovajetta.

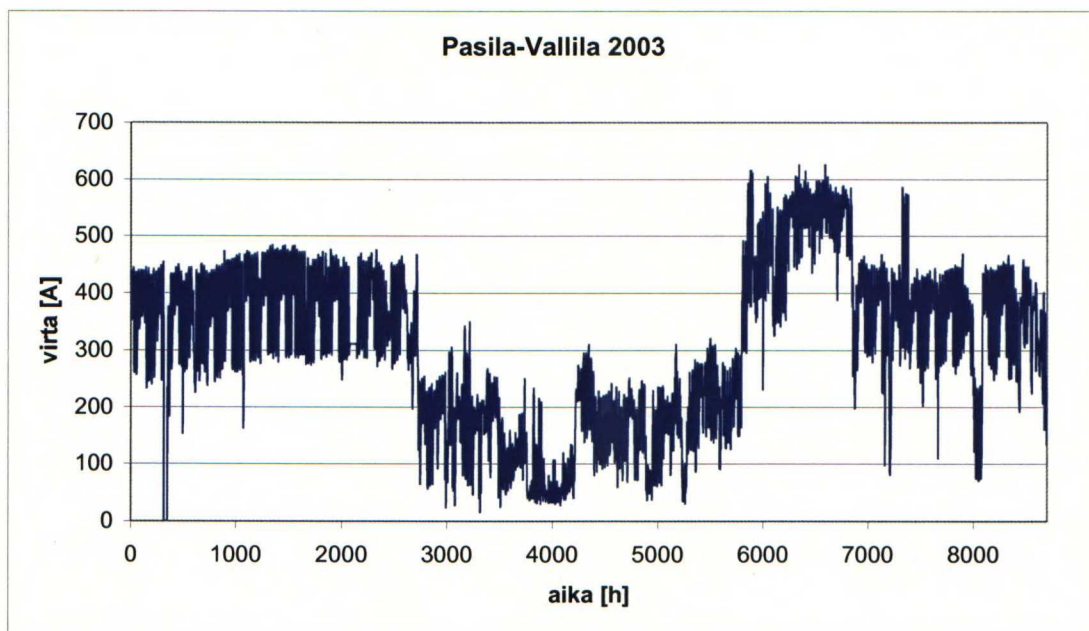
### 3.5 Nykyinen ratkaisumalli

Tähän mennessä kaapelireitin Viikinmäki - Pasila - Vallila - Suvilahti ylikuormittuessa, on se väliaikaisesti avattu väliltä Pasila - Vallila. Yhteyden ollessa auki virta on pakotettu kulkemaan pitkin avojohtoja, joiden kuormitettavuus on huomattavasti kaapelia suurempi. Tällöin Pasilan sähköasema on syötetty säteittäisesti. Kaapeliyhteyden avausväli on valittu siten, että samaan säteishaaraan ei tule 10 kV ja 20 kV toisiojännitteisiä sähköasemia, ja ettei samassa haarassa ole useampaa kuin yksi asema.

Verkon käyttövarmuus kärsii poistettaessa silmukoita verkosta. Lisäksi kaapelin kytkeminen virrattomaksi ja jälleen virralliseksi rasittaa kaapelia, joten se ei ole suotavaa. Syynä rasitukseen on kaapelin lämpötilan muutoksista aiheutuva lämpölaajeneminen,



joka voi aikaansaada eristeen saumakohdassa tapahtuvaa purkautumista tai metallin väsymisestä johtuen säikeen katkeamisen, minkä seurauksena kaapelissa alkaa syntyä osittaispurkauksia. Myös verkossa syntyvät häviöt hieman nousevat kaapelireitin ollessa auki. Kuvassa 3.16 on esitetty välin Pasila - Vallila kaapelin (730 m AHXLMK800 + 860 m OHPLKM400) virtatiedot vuodelta 2003.



**Kuva 3.16.** Pasila-Vallila kaapelin virtatiedot vuodelta 2003.

Kaapelin maksimikuormitusvirta on 600 A. Kuvasta nähdään kaapelireitin avaamiset nollaan ulottuvina piikkeinä. Piikkejä kuvaajaan voi aiheuttaa myös se, että mittaukset ovat olleet mittaushäiriön seurauksena pois päältä. Tyypillisesti kaapelia ei jouduta avaamaan edes joka vuosi, mutta tietynlaisissa kytkentätilanteissa avaamisia ja sulkemisia saattaa esiintyä päivittäin.

### 3.6 Vertailu

Kaikki edellä mainitut vaihtoehdot ovat periaatteellisesti mahdollisia. Ratkaistavaksi tulee se, mitä ominaisuuksia laitteistolta halutaan. Valintakriteereiksi on valittu syntyvät kustannukset, ratkaisun tehokkuus kyseisen ongelman hoidossa, tilan tarve, verkostovaikutukset ja ratkaisun soveltuvuus ennustetussa tulevaisuudessa.

Avojohtojen muuttaminen kaapeleiksi tulisi maksamaan paljon, mutta samalla säästettäisiin pylväslinjojen kuluttamaa tilaa. Sarjakompensointi pienentäisi verkon häviöitä sekä lisäisi stabiilisuutta, mutta on suhteellisen kallis järjestelmä (kompensointitehosta ja suojauksesta riippuen n. 2 – 4 M€). FACTS:sta saadut hyödyt ovat periaatteessa samat kuin sarjakompensoinnissa, mutta järjestelmä on vieläkin kalliimpi (n. 15 M€). Parannuksena FACTS:ssa on säädettävyys. Virranrajoituskuristimesta aiheutuu verkossa lisää häviöitä ja stabiilisuuden alentumista, mutta se on samalla selvästi edullisin ja myös suhteellisen kompakti ratkaisu.

**Taulukko 3.1.** Ratkaisuvaihtoehtojen vertailua.

	virranrajoituskuristin	sarjakompensointi	FACTS	verkostorakenteen muutos	nykymalli
hinta	2	3	3	4	1
tehokkuus	1	2	2	2	4
tilan tarve	2	3	3	1	1
vaikutukset	2	1	1	2	3
muokattavuus	2	3	1	3	4

Taulukossa 3.1 on valittuja eri ominaisuuksia arvioitu asteikolla 1-4, jossa pieni numero on merkinä laitteen hyvästä puolesta vertailtavassa ominaisuudessa ja suuri numero merkinä siitä, että kyseinen ominaisuus ei ole laitteen vahvuus.

Kokonaisuutta arvioitaessa virranrajoituskuristin näyttäisi olevan selkeästi paras vaihtoehto Helsingin Energian tarpeeseen. Hinta on suhteellisen alhainen, tehokkuus tehonjaon muuttamiseksi on erittäin hyvä ja tilan tarve on kohtuullinen. Kuristin on myös erittäin yksinkertainen ja luotettava komponentti. Verkostovaikutuksia käsitellään luvussa 5 tarkemmin, mutta ne eivät ole ongelma vahvassa rengasvoimansiirtoverkossa. Lisäksi mahdollisten väliottojen avulla voidaan laitteen muokattavuutta lisätä, mikä on tulevaisuutta ajatellen hyvä ominaisuus.

Sarjakompensoinnin ja FACTS:n ongelmaksi tulevat kustannukset verkossa, jossa johdot ovat lyhyitä. Ollakseen taloudellisesti kannattava tulisi sarjakompensoinnissa siirtojohdon vähimmäispituuden olla noin 300 km /7/ , kun pisimmätkin johdot Helsingissä ovat alle 10 km pitkiä. Lisäksi FACTS:n etuna oleva hyvä säädettävyys on suurelta osin turha kyseisessä tarpeessa, jossa tehon jakautuminen halutaan pitää jatkuvasti vakiona.



## **4 Virranrajoituskuristimen mitoitus**

Suunnitteilla olevan kuristimen sijainniksi tulee kaapeliväli Viikinmäki - Pasila. Tällöin kuristin pakottaa virran kulkemaan nykyistä enemmän avojohtoja pitkin Pitäjänmäen ja Herttoniemen kautta, jolloin reitin Viikinmäki - Pasila - Vallila - Suvilahti kuormitusaste laskee.

### **4.1 Kuristimen reaktanssin määrittäminen**

#### **4.1.1 Laskentatilanteet**

Mitoitettaessa kuristimen kokoa, tulee huomioida verkon mahdolliset eri toimintatilat. Vaikuttavia tekijöitä ovat erilaiset voimalaitoksien käyttötilanteet (päällä/pois päältä tai osa tehosta käytössä), johtojen toimintatilat (auki/kiinni) ja kuormat. Kuristin tulee mitoittaa myös siten, että se palvelee käyttötarkoitustansa pitemmällä tähtäimellä kuin pelkästään tämän hetken tilanteessa.

Jos verkkoon lisätään kuristin, vaikuttaa se myös koko muun verkon tehonjakoon. Verkkoa tulee tarkastella tämän seurauksena kokonaisuutena, eikä paneutua pelkästään johtovälille Vm - Ps.

Verkon kuormituksille on määritetty neljä erityyppistä tilannetta vuodenajasta ja vuorokaudenajasta riippuen:

- talvipäivä
- talviyö
- kesäpäivä
- kesäyö.

Taulukossa 4.1 on esitetty eri aikajaksoja vastaavat sähköasemakohtaiset kuormitustehot vuonna 2002 ja 2020. Vuoden 2020 tilanne on ennustettu olettaen kuormien ominaiskulutuksen kasvuprosentiksi 0,50 ja huomioimalla yleiskaavan 2002 mukaiset rakentamisennusteet. Vuoden 2020 laskennoissa tulee lisäksi huomioida välille Viikinmäki - Vallila suunniteltu rinnakkainen kaapeliyhteys. Rinnakkaiselle yhteydelle asennetaan vastaavan suuruiset kuristimet.

**Taulukko 4.1.** Sähköasemien kuormitustehot vuonna 2002 ja 2020.

	tehot 2002 [MW]				tehot 2020 [MW]			
	talvipäivä	talviyö	kesäyö	kesäpäivä	talvipäivä	talviyö	kesäyö	kesäpäivä
Kamppi	42	16	17	39	51	20	21	55
Kasarmitori	40	20	13	28	45	22	15	39
Kruununhaka	31	12	19	40	35	14	22	45
Meilahti	34	17	15	30	39	19	17	36
Punavuori	38	13	12	24	47	16	15	33
Salmisaari	35	17	15	33	45	23	19	44
Suvilahti	43	19	18	40	61	27	26	60
Töölö	26	13	12	29	30	15	13	33
Vallila	30	15	16	36	46	23	24	55
Herttoniemi	44	19	13	30	58	25	17	40
Kannelmäki	59	25	16	40	71	30	20	48
Laajasalo	17	10	5	8	27	16	8	14
Mellunkylä	0	0	0	0	0	0	0	0
Myllypuro	43	19	16	32	52	23	19	38
Pasila	47	24	21	49	47	24	21	50
Pohjois-Pasila	-	-	-	-	47	24	21	50
Pitäjänmäki e	29	13	14	35	33	15	16	40
Pitäjänmäki p	40	29	19	24	49	35	23	29
Suurmetsä	32	16	9	16	59	30	16	29
Tapanila	50	26	13	30	56	30	15	33
Viikinmäki	55	32	22	27	74	43	30	37
Vuosaari	32	14	8	19	57	25	14	41
muut	27	8	6	27	27	8	6	27

Lisäksi voimalaitosten tuotanto vaihtelee vuodenaajoista ja muista tilanteista (huolto yms.) riippuen, joka määrittää suurelta osin virtojen kulkusuunnan järjestelmässä.

Perustilanteessa kaikki Helsingin sisäiset johdot ovat kiinni, mutta haettaessa hankalimpia toimintatilanteita luvussa 2.3 mainitun N-1 periaatteen mukaisesti, tulee toiminnan kannalta tärkeitä johtovälejä aukoa. Laskennat suoritetaan ilman kuristinta sekä 3, 5, 7 ja 10  $\Omega$  kuristimien kanssa. Kuormituksina käytetään vuoden 2002 kuormitustietoja sekä arvioituja vuoden 2020 arvoja. Laskennassa käytetään Edsa Micro Corporationin valmistamaa Edsa V3.60.10 - verkostolaskentaohjelmistoa.

Kaapelin Viikinmäestä Suvilahteen kuormittumisen kannalta merkittävin yksittäinen tekijä on avojohdon Suvilahti - Herttoniemi (2x2Duck) sekä Salmisaari - Meilahti Salmisaari - Pitäjänmäki (2x2Duck) toiminta. Voidaan todeta kaksi tilannetta, jotka aiheuttavat verkon ylikuormittumisvaaran:

- Kesäpäivällä korkean kulutuksen aikaan kantakaupungissa sijaitseva tuotanto on poissa käytöstä ja Suvilahti - Herttoniemi johdot irtoavat verkosta. Nyt te-



ho pitää saada siirrettyä keskustan alueelle pohjoisesta päin tulevia siirtolinjoja pitkin, jolloin kaapeli Viikinmäki - Suvilahti voi ylikuormittua.

- Talviyöllä kantakaupungin alueella on erittäin pieni kulutus samanaikaisesti täyden tuotannon kanssa ja avojohdot Salmisaari - Meilahti ja Salmisaari - Pitäjänmäki irtoavat verkosta. Nyt teho pitää saada siirrettyä verkossa keskustasta poispäin, jolloin vaarana on kaapelin Viikinmäki - Suvilahti ylikuormittuminen.

Molemmissa edellä mainituissa tilanteissa kaksoisavojohdotyhteyden aukeaminen voidaan katsoa olevan N-1 periaatteen mukainen vika, koska vikaantuvat johdot kulkevat samoilla pylväillä, ja siten avautuvat yhdestä ja samasta alkusyystä.

Laskennat suoritetaan seuraavilla kytkentätilanteilla:

- 1: Kesäpäivä 2002, ei tuotantoa.
- 2: Kesäpäivä 2002, ei tuotantoa, Suvilahti - Hanasaari kaksoisavojohdotyhteys auki.
- 3: Talviyö 2002, Helsingin Energian tuotanto ja Kellosaaren huippuvoimalaitos.
- 4: Talviyö 2002, Helsingin Energian tuotanto ja Kellosaaren huippuvoimalaitos, Salmisaari - Meilahti ja Salmisaari - Pitäjänmäki avojohdotyhteydet auki.
- 5: Kesäpäivä 2020, ei tuotantoa.
- 6: Kesäpäivä 2020, ei tuotantoa, Suvilahti - Hanasaari kaksoisavojohdotyhteys auki.
- 7: Talvipäivä 2020, Hanasaaren voimalaitos poissa käytöstä, Suvilahti - Hanasaari kaksoisavojohdotyhteys auki.

#### 4.1.2 Kuormitukset

Kuormitusvirrat on ilmoitettu suhteellisina arvoina kyseisen johdon maksimikuormitusvirtaan nähden. Taulukoihin 4.2 - 4.8 on laskettu eri kytkentä- ja kuormitustilanteita vastaavia johtojen kuormitusasteita. Kaikkien johtojen tulokset on nähtävillä liitteeseen kolme lasketuissa graafisissa verkkokuvissa. Taulukoissa paksulla kirjoitetut johdot ovat

kaapeleita ja ohuella kirjoitetut avojohtoja. Kuormitusasteen ollessa alle 0,75 on värinä käytetty vihreää, välillä 0,75 - 1,00 sinistä ja kuormitusasteen ollessa yli 1,00 (= yli-kuormitustilanne) väritys on punainen.

**Taulukko 4.2.** KytKentätilanne 1:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	1,18	0,47	0,34	0,27	0,22
<b>Ps-VI</b>	0,64	0,10	0,23	0,30	0,36
<b>VI-Su</b>	0,17	0,21	0,28	0,32	0,35
Vm-Pm	0,12	0,17	0,18	0,19	0,20
Vm-Hn	0,08	0,02	0,04	0,04	0,05
Hn-Su	0,35	0,46	0,48	0,49	0,50
Pm-Sa	0,13	0,19	0,20	0,21	0,21
Tm-Vm	0,56	0,53	0,52	0,52	0,52

**Taulukko 4.3.** KytKentätilanne 2:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	2,12	1,10	0,84	0,68	0,53
<b>Ps-VI</b>	1,58	0,54	0,28	0,14	0,09
<b>VI-Su</b>	0,65	0,13	0,07	0,13	0,20
Vm-Pm	0,19	0,39	0,44	0,47	0,50
Vm-Hn	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32
Hn-Su	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pm-Sa	0,23	0,47	0,54	0,57	0,61
Tm-Vm	0,59	0,55	0,54	0,53	0,53

**Taulukko 4.4.** KytKentätilanne 3:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	0,81	0,31	0,22	0,17	0,14
<b>Ps-VI</b>	1,02	0,52	0,43	0,38	0,34
<b>VI-Su</b>	0,59	0,33	0,29	0,26	0,24
Vm-Pm	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05
Vm-Hn	0,15	0,21	0,22	0,23	0,23
Hn-Su	0,14	0,21	0,23	0,24	0,24
Pm-Sa	0,23	0,28	0,28	0,29	0,29
Tm-Vm	0,31	0,29	0,29	0,28	0,28

**Taulukko 4.5.** KytKentätilanne 4:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	1,42	0,62	0,45	0,35	0,27
<b>Ps-VI</b>	1,63	0,84	0,67	0,57	0,48
<b>VI-Su</b>	0,91	0,50	0,41	0,36	0,31
Vm-Pm	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20
Vm-Hn	0,23	0,38	0,41	0,43	0,45
Hn-Su	0,25	0,45	0,49	0,52	0,54
Pm-Sa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tm-Vm	0,33	0,31	0,30	0,30	0,29



**Taulukko 4.6.** KytKentätilanne 5:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	1,00	0,50	0,39	0,32	0,25
<b>Ps-VI</b>	0,71	0,21	0,11	0,08	0,10
<b>VI-Su</b>	0,46	0,11	0,21	0,28	0,35
Vm-Pm	0,14	0,22	0,24	0,25	0,26
Vm-Hn	0,18	0,05	0,02	0,01	0,02
Hn-Su	0,43	0,59	0,62	0,65	0,67
Pm-Sa	0,13	0,22	0,24	0,25	0,27
Tm-Vm	0,81	0,77	0,76	0,75	0,75

**Taulukko 4.7.** KytKentätilanne 6:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	1,68	1,10	0,90	0,76	0,62
<b>Ps-VI</b>	1,39	0,80	0,60	0,46	0,32
<b>VI-Su</b>	1,17	0,56	0,36	0,23	0,13
Vm-Pm	0,20	0,43	0,51	0,57	0,62
Vm-Hn	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50
Hn-Su	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pm-Sa	0,22	0,49	0,60	0,67	0,74
Tm-Vm	0,86	0,81	0,80	0,79	0,78

**Taulukko 4.8.** KytKentätilanne 7:n kuormitukset.

johto/kuristin	0 ohm	3 ohm	5 ohm	7 ohm	10 ohm
<b>Vm-Ps</b>	1,16	0,75	0,62	0,52	0,43
<b>Ps-VI</b>	0,89	0,49	0,35	0,26	0,16
<b>VI-Su</b>	0,72	0,30	0,17	0,10	0,10
Vm-Pm	0,20	0,36	0,41	0,45	0,49
Vm-Hn	0,65	0,63	0,63	0,63	0,63
Hn-Su	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pm-Sa	0,05	0,24	0,31	0,36	0,40
Tm-Vm	0,49	0,45	0,44	0,44	0,43

Kuormitusasteista päätellen näyttäisi siltä, että viidestä ohmista ylöspäin olevat kuristimet pystyvät hoitamaan kaapelin ylikuormittumisongelman. Kuristimen koon kasvaessa liian suureksi muu verkko alkaa kuormittua epätasapainoisesti ja virrat kiertävät turhaan pitkiä kiertoteitä. Tällöin verkossa syntyvät häviöt kasvavat. Tilanteissa, joissa kuormituspainetta kohdistuu erityisen paljon kaapelille Viikinmäki - Vallila, voi seitsemän ohmin kuristin olla paras ratkaisu, mutta viidenkään ohmin kuristimella ei synny ylikuormitusta. Kuristimen voisi myös toteuttaa välioton avulla, jolloin valittavat portaavat olisivat 5 ja 7 ohmia.

## 4.2 Kuormitusvirta

Tutkitaan vielä valituilla kuristimilla verkon kuormituksia ns. normaaleissa eri vuoden- ja vuorokaudenajan tilanteissa vuosina 2002 ja 2020. Laskennoissa on kaikki johdot kiinni ja voimalaitoksien sekä kuormitusten suuruuksia muutellaan käyttötilanteesta riippuen. Tulokset ja laskentatilanteet ovat nähtävillä liitteessä 4.

Tuloksista nähdään, että kuormitukset verkossa ovat melko tasaisia sekä viiden että seitsemän ohmin kuristimilla. Eniten kuormittuvat johdot löytyvät kuristinasennuksen jälkeen Vuosaaren sähköasemalta lähtevillä avojohto-osuuksilla. Kuristimen vaikutus Vuosaaren tilanteeseen on kuitenkin jo suhteellisen vähäistä (noin 2 % luokkaa). Enemmänkin tilanne on hieman helpompi, kun virta pyrkii kulkemaan pohjoiseen päin lähteville avojohdoille.

## 4.3 Vikavirrat

Samalla kun kuristin vaikuttaa verkon tehonjakoon, vaikuttaa se myös vikavirtojen suuruuteen.

Suurin mahdollinen virta, joka voi vikatilanteessa kulkea kuristimen läpi, voidaan laskea siten, että oletetaan koko systeemin jännitteen vaikuttavan kuristimen yli. Tällöin

$$I_{R\max} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_R} = \frac{110kV}{\sqrt{3} \cdot 5\Omega} = 12,7kA \quad (4.1)$$

missä  $I_{R\max}$  = kuristimen maksimi vikavirta

$Z_R$  = kuristimen impedanssi

$U$  = jännite.

Verkon mitoitusperiaatteena on pidetty 40 kA kolmivaiheista oikosulkuvirtaa yhden sekunnin ajan. Tällaista tilannetta vastaava impedanssi on

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{110kV}{\sqrt{3} \cdot 40kA} = 1,6\Omega. \quad (4.2)$$

Arvioidaan, että Viikinmäessä pienin mahdollinen oikosulkuvirta olisi 3 kA. Tätä vastaava impedanssi on

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{110kV}{\sqrt{3} \cdot 3kA} = 21,2\Omega.$$

Jos lisäksi kaapeli Viikinmäki - Pasila on säteissyötössä, laskee Pasilan oikosulkuvirta kuristimen lisäämisen seurauksena seuraavasti

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (Z + Z_R)} = \frac{110kV}{\sqrt{3} \cdot (21,2 + 5)k\Omega} = 2,4kA.$$

Laskussa on oletettu, että aiemmin laskettu 3 kA:n oikosulkuvirtaa vastaava impedanssi olisi puhtaasti induktiivinen.

#### 4.4 Ylijännitteet

Ylijännitteet voidaan jakaa luonteeltaan kahteen eri luokkaan. Toisen muodostavat voimakkaasti vaimenevat ja lyhytaikaiset ylijännitteet, toisen taas vaimenemattomat tai heikosti vaimenevat ylijännitteet, joiden kesto aika saattaa olla melko pitkä. Lyhytaikaiset ylijännitteet jaetaan vielä kahteen osaan: ilmastollisiin- ja kytkentäylijännitteisiin. Erona näiden ylijännitteiden välillä on jänniterasituksen kesto aika. Ilmastollisiksi ylijännitteiksi kutsutaan jänniterasituksia, jotka saavuttavat huippuarvonsa muutamassa  $\mu s$  ja vaimenevat sitten muutaman kymmenen  $\mu s$  kuluttua. Kytkentäylijännitteet saavuttavat huippuarvonsa satojen  $\mu s$  kuluessa ja vaimeneminen tapahtuu noin ms luokkaa olevassa ajassa. /2/

Vaikka nimitykset ilmastollinen ja kytkentäylijännite viittaavatkin niiden tyyppilliseen syntytapaan, eivät ne tarkoita sitä ettei kytkentätilanteissa saattaisi esiintyä jyrkkäreunaisia ylijännitteitä tai ettei ukkosyhteydessä esiintyisi loivia ylijännitteitä. /2/

##### 4.4.1 Ilmastolliset ylijännitteet

Ilmastollisia ylijännitteitä aiheuttaa salamanisku joko suoraan jännitteeseen johtimeen, johdon maadoitettuun osaan (takaisku) tai sen välittömään läheisyyteen (indusoitunut ylijännite). /2, 18/



### *Suoraan vaihejohtimeen osuvat salamaniskut*

Salamaniskun osuessa suoraan vaihejohtimeen, syntyvät suurimmat ilmastolliset ylijännitteet. Salamavirta jakautuu kulkuaaltoihin, jotka etenevät johdon molempiin suuntiin. Syntyvä ylijännite iskukohdassa voidaan laskea yhtälöllä /2, 18/

$$u = \frac{1}{2} Z_w i \quad (4.3)$$

missä  $Z_w$  = vaihejohtimen aaltoimpedanssi

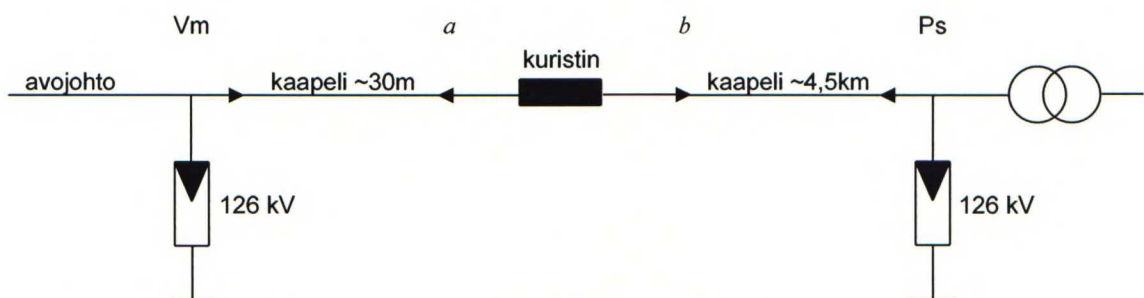
$i$  = salamavirran huippuarvo.

Avojohtoon aaltoimpedanssi on noin  $250 - 500 \Omega$  /18/. Lasketaan esimerkkinä tilanne, jossa salamavirran huippuarvo on  $20 \text{ kA}$  ja vaihejohtimen aaltoimpedanssi  $450 \Omega$ . Tällöin iskukohdan jännitteeksi saadaan

$$u = \frac{1}{2} \cdot 450 \Omega \cdot 20 \text{ kA} = 4,5 \text{ MV}.$$

Suuri osa suoraan vaihejohtimeen osuvista iskuista johtaa ylilyöntiin. Johdon jännitelujuus rajoittaakin ylijännitteen suuruutta, lisäksi johdon korona sekä johdossa ja maapiirissä tapahtuvat häviöt vaimentavat ja loiventavat johdolla etenevää aaltoa. /2, 18/

Kuvassa 4.1 on esitetty tämän hetkinen ylijännitesuojaus Viikinmäki - Pasila kaapelille, sekä kuristimen suunniteltu sijainti kaapelilla.

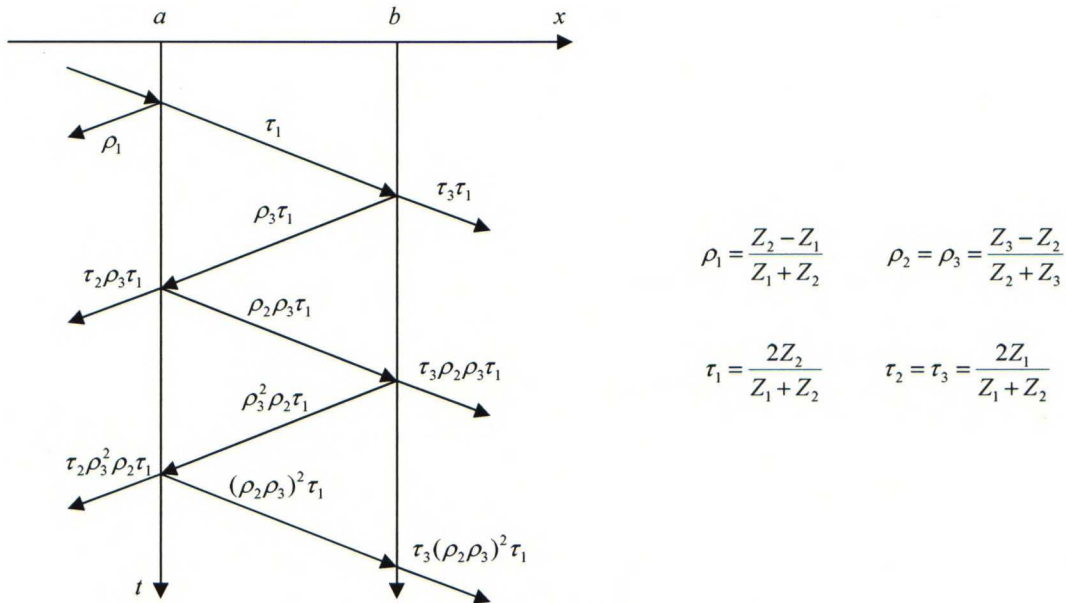


**Kuva 4.1.** Kaapelin Viikinmäki - Pasila ylijännitesuojaus.

Kuristimella vaikuttavia salamaniskusta aiheutuvia ylijännitteitä voidaan arvioida siten, että ajatellaan kuristimen molempiin päihin epäjatkuvuuskohdat (kuvassa 4.1 kohdat *a* ja *b*). Epäjatkuvuuskohdista tapahtuu heijastuksia, joiden suuruus riippuu vierekkäisten komponenttien aaltoimpedanssien suuruuserosta. Kuvassa 4.2 on esitetty aaltokaavio



kuvan 4.1 mukaiselle kaapeli-kuristin-kaapeli kytkennälle. Oletuksena on, että syöksyaalto tulee Viikinmäestä päin ja kuristimelta lähtevät kaapelit ovat niin pitkiä, ettei niiden päistä tapahtuvia heijastuksia tarvitse ottaa huomioon.



**Kuva 4.2.** Kaapeli-kuristin-kaapeli yhdistelmän aaltokaavio.

Kaapelin alussa oleva 126 kV venttiilisuoja rajaa kaapelille tulevan syöksyaallon korkeuden. Suojaustaso ukkosylijännitteitä vastaan suojalla on 315 kV. Kuvasta 4.2 voidaan päätellä, että suurin mahdollinen jännite, joka voi heijastuksen seurauksena syntyä on kaksinkertainen venttiilisuojan suojaustasoon nähden eli 630 kV.

Lasketaan esimerkkinä tilanne, jossa kuristin oletetaan pistemäiseksi komponentiksi. Tällöin voidaan laskea aikavakio  $\tau$ , joka riippuu kuristimen induktanssista  $L$  ( $= 15,915$  mH) ja kuristimelta lähtevien kaapelien aaltoimpedansseista  $Z_1$  ja  $Z_3$  ( $= 42 \Omega$ ) sekä jännitteet kuristimen navoilla  $a$  ja  $b$  eri ajan hetkillä.

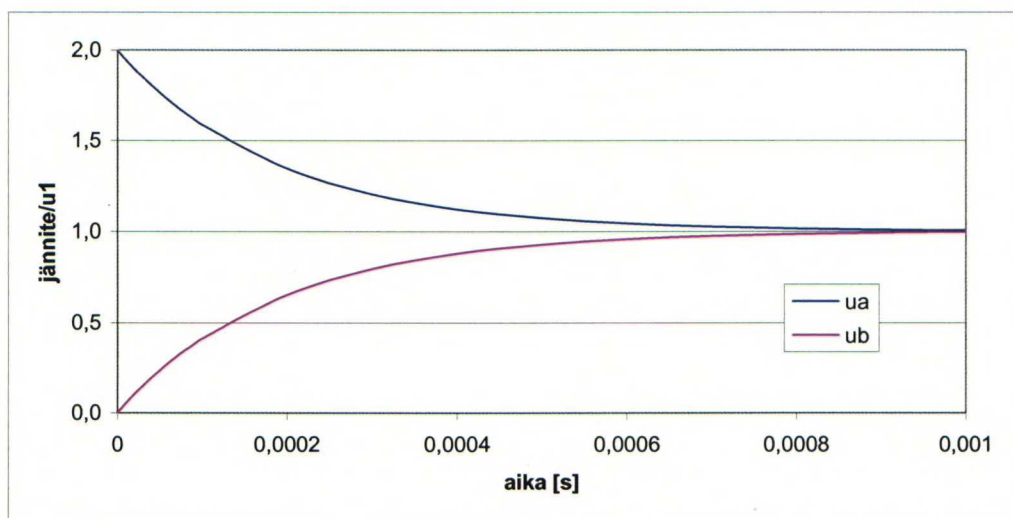
$$\tau = \frac{L}{Z_1 + Z_3} \quad (4.4)$$

$$u_a = 2u_1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} 2u_1 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.5)$$

$$u_b = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} 2u_1 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.6)$$

Syntyvät jännitteet pisteissä  $a$  ja  $b$  ovat, suhteessa tulevan syöksyaallon jännitteeseen  $u_1$ , kuvan 4.3 mukaiset. Laskennassa on oletettu muiden sähköasemalähtöjen olevan auki,

jolloin ylijänniteaalto ei pääse purkautumaan muissa ylijännitesuojissa (ns. dead end-periaate).



**Kuva 4.3.** Jännitteet pisteissä *a* ja *b*.

Kuvasta 4.3 voidaan nähdä suurimman jännitteen tulevan pisteeseen *a* heti ensimmäiseksi, kun syöksyaalto kohtaa kaapeli-kuristin rajapinnan (= ajanhetki 0 s). Jännite saa arvoksi  $2u_1$ , joten kun suojaustaso on 315 kV (= suurin mahdollinen  $u_1$ :n arvo), suurin mahdollinen syntyvä jännite on 630 kV. Alussa myös kuristimen yli vaikuttaa samansuuruinen jännite. Kuristin on mitoitettu kestäämään 550 kV:n jännite kuristimen yli ja maata vastaan salamasyöksyjännitteillä. Ylijännitesuojien suojaustasoa syöksyjännitteitä vastaan on siten parannettava tai asennettava kuristimien päätteille omat suojat.

### *Takaisku*

Salamaniskun osuessa maadoitettuun osaan, kuten pylvääseen tai ukkosjohtimeen, voi syntyä purkaus maadoitetusta osasta vaihejohtimeen. Ilmiötä kutsutaan takaiskuksi. Vastaavasti kuin suorassa salamaniskussa, lähtee takaiskussa purkaukohdasta syöksyaalto molempiin suuntiin. Tapahtuneen ylilyönnin takia on jänniteimpulssin rinnan jyrkkyys varsin suuri. Tämän seurauksena takaisku on erittäin vaarallinen induktanssia sisältäville verkon laitteille. /2/

Takaiskusta aiheutuvia vaikutuksia voidaan tarkastella samaan tapaan kuin suoraan vaihejohtimeen osuvien salamien vaikutuksia. Kuristimesta ja kaapeleista syntyy kuvan 4.2 tapaan heijastuksia ja suojaustaso ylijännitesuojilla on edelleen 315 kV.

### Indusoituvat ylijännitteet

Salama voi aiheuttaa ylijännitteitä myös osuessaan johtojen tai sähkölaitteiden välittömään läheisyyteen. Tällä tavalla syntyvää ylijännitettä kutsutaan indusoituneeksi ylijännitteeksi. Indusoituneen ylijännitteen aiheuttajana on salaman pääpurkausvirran sähkömagneettinen induktio. Voidaan ajatella, että salamavirta aiheuttaa nopeasti muuttuvan magneettikentän, joka aikaansaa johdolle jännitteen. /18/

Indusoituneen ylijännitteen suuruutta arvioidaan yhtälön 4.7 avulla.

$$u_{ind} = kiZ_0 \frac{h}{d} \quad Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 30\Omega \quad (4.7)$$

missä  $u_{ind}$  = indusoituva jännite

$k$  = kerroin, joka ottaa huomioon salamavirran etenemisnopeuden purkanuskanavassa (yleensä arvoksi annetaan 1,2 - 1,3)

$i$  = salamavirran huippuarvo

$h$  = johdon korkeus

$d$  = iskupaikan etäisyys johdosta

$Z_0$  = impedanssin dimension omaava vakio

$\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti ( $\approx 1,257\text{E-}6 \text{ N/A}^2$ )

$\varepsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys ( $\approx 8,854\text{E-}12 \text{ F/m}$ ).

Ylijännitteiden amplitudit ovat tavallisesti suhteellisen pieniä ( $\leq 200 - 300 \text{ kV}$ ), joten ne eivät ole vaarallisia 110 kV:n jännitetasolla. /2/

#### 4.4.2 Kytkentäylijännitteet

Verkon äkillisissä tilanmuutoksissa tasoitusilmiönä muodostuvia ylijännitteitä kutsutaan kytkentäylijännitteiksi. Tilanmuutoksena voi olla mm. verkossa suoritettavat kytkentätoimenpiteet, kuten virtapiirin avaaminen ja sulkeminen katkaisijalla. Syntyvien kytkentäylijännitteiden muotoon ja suuruuteen vaikuttaa olennaisesti käytettävien kytkinlaitteiden katkaisu- ja jälleensyttymisominaisuudet sekä verkon ominaisuudet. Jälleensyttymiseksi kutsutaan tilannetta, jossa katkaisijan avautuessa avausvälin yli



vaikuttava palaava jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden, jonka seurauksena on läpilyönti. Katkaisijan molemmilla puolilla olevien verkkojen induktanssit ja kapasitanssit määräävät tasoitusvärähtelyjen taajuuden. Värähtelyn amplitudi riippuu taas jännitteen ja virran hetkellisarvosta jälleensyttymishetkellä, verkon vaimenemisominaisuuksista ja katkaisijan ominaisuuksista. Kytchentätilanteessa syntyviä ylijännitteitä voidaan tehokkaasti pienentää oikeilla katkaisija- ja suojalaitevalinnoilla. /2, 18, 20/

### *Pienen induktiivisen virran katkaisu*

Katkaistaessa kuristimen virtaa, jonka suuruusluokka on pienempi kuin muutama 100 A, voidaan puhua pienen induktiivisen virran katkaisusta. Kuristimeen on varautunut energia joka on verrannollinen sen läpi kulkevaan virtaan seuraavasti

$$W_R = \frac{1}{2} Li^2 \quad (4.8)$$

missä  $i$  = virran hetkellisarvo  
 $L$  = kuristimen induktanssi.

Vastaavasti piirin kapasitansseihin on varautunut niiden yli vaikuttavaan jännitteeseen verrannollinen energia

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (4.9)$$

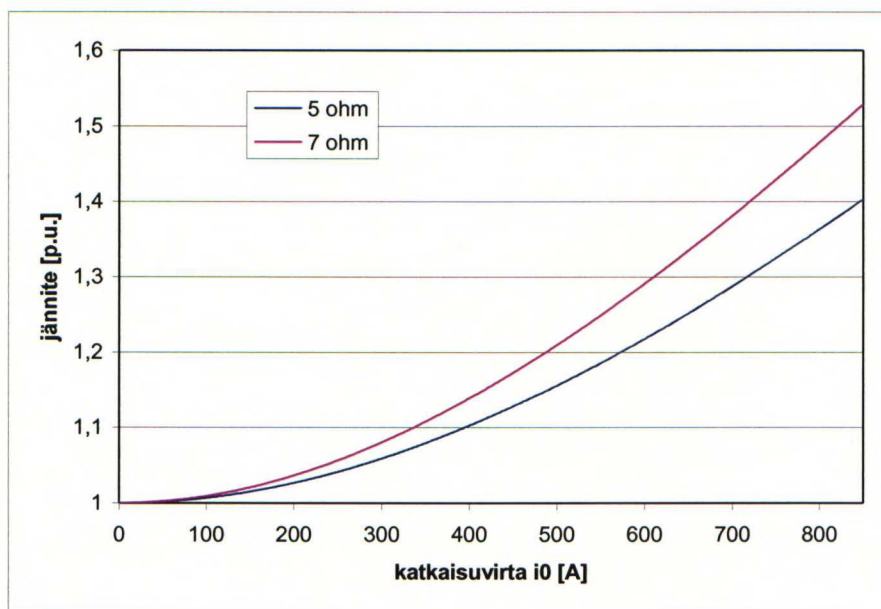
missä  $u$  = jännitteen hetkellisarvo  
 $C$  = piirin kapasitanssi.

Katkaistaessa kuristimen virta, siirtyy siihen varautunut energia verkon kapasitansseihin, jonka seurauksena jännite nousee. Energian yhtälöistä voidaan helposti päätellä, että jännitteen nousu on riippuvainen virran hetkellisarvosta, kuristimen koosta ja kapasitanssien suuruudesta. Jännitteen maksimi arvoksi saadaan

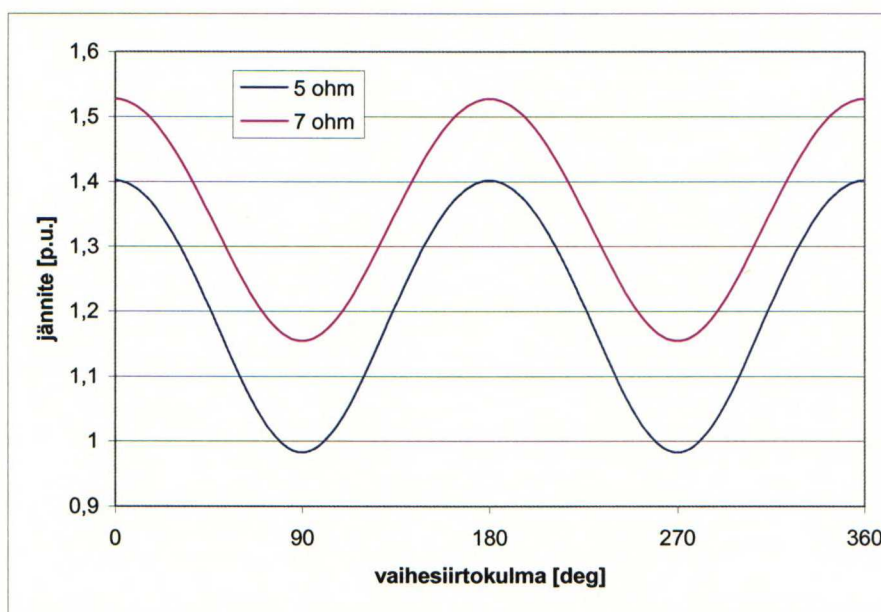
$$u_{\max} = \sqrt{u^2 + \frac{L}{C} i^2} . \quad (4.10)$$



Kuviin 4.4 ja 4.5 on hahmoteltu kytkimen avaamisesta aiheutuvia jännitteen suuruuksia. Olettamuksena on, että Viikinmäki - Pasila kaapeli on säteittäissyötössä ja kuristimen sekä kaapelin induktansseihin varautunut energia siirtyy kokonaisuudessaan kaapelin maakapasitansseille. L/C suhteena on täten käytetty viiden ohmin kuristimen tilanteessa 10814 H/F ja seitsemän ohmin kuristimella 14929 H/F.

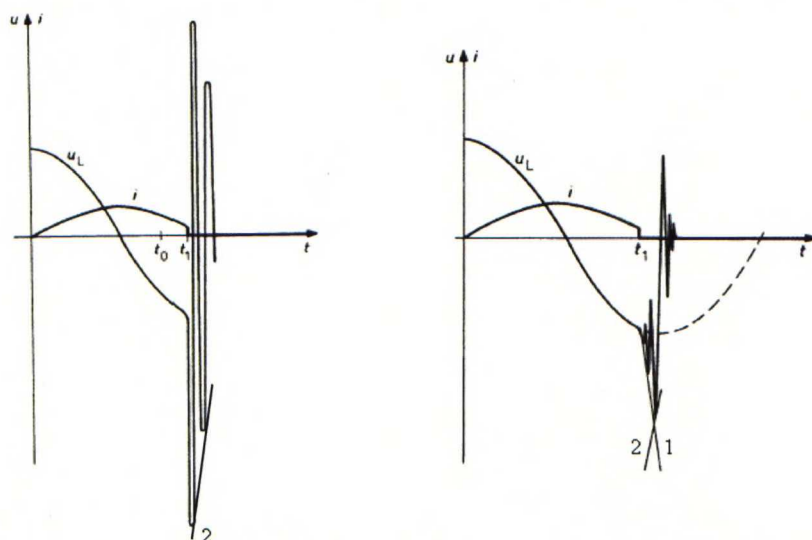


**Kuva 4.4.** Kytkenäjäännitteen huippuarvot katkaistaessa virta jännitteen huippuarvossa.



**Kuva 4.5.** Kytkenäjäännitteen huippuarvot katkaistaessa virta sen huippuarvossaan maksimikuormitusvirralla (= 600 A).

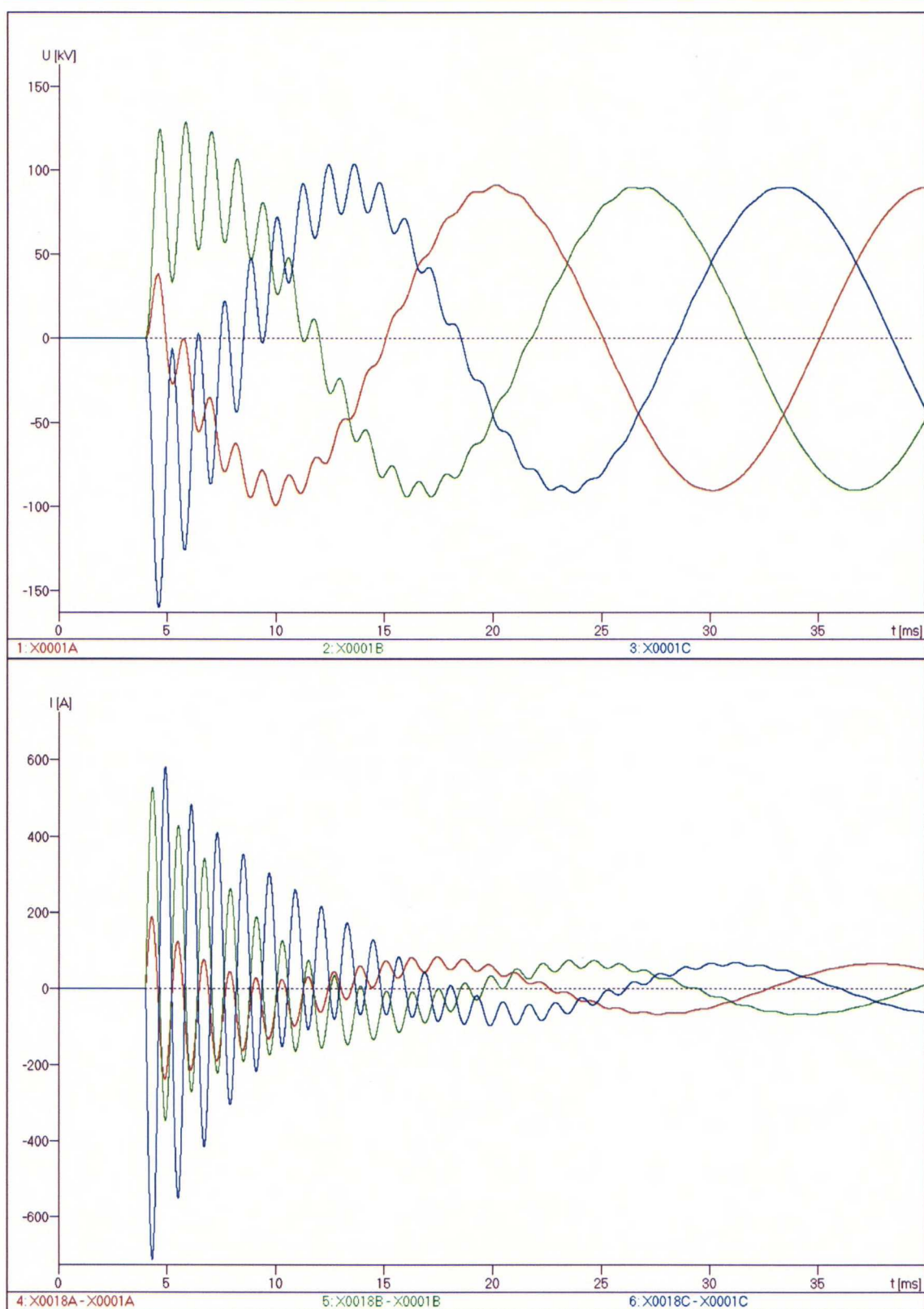
Syntyvät ylijännitteet eivät ole kovin suuria kuristimen lisäämisestä huolimatta, koska kaapeleista aiheutuvat induktanssit ovat itsessään pieniä ja kapasitanssit ovat taas suhteellisen korkeita verrattaessa avojohtojen arvoihin. Kuvassa 4.6 on esitetty katkaisijan jälleensyttymisominaisuuden vaikutusta ylijännitteen suuruuteen virtaa katkaistaessa. Vasemman puoleisessa kuvassa kytkimellä ei tapahdu jälleensyttymisiä, kun taas oikean puoleisessa jälleensyttymiset rajoittavat ylijännitteen huippua.



**Kuva 4.6.** Jännite ja virta pienen induktiivisen virran katkaisussa. /2/

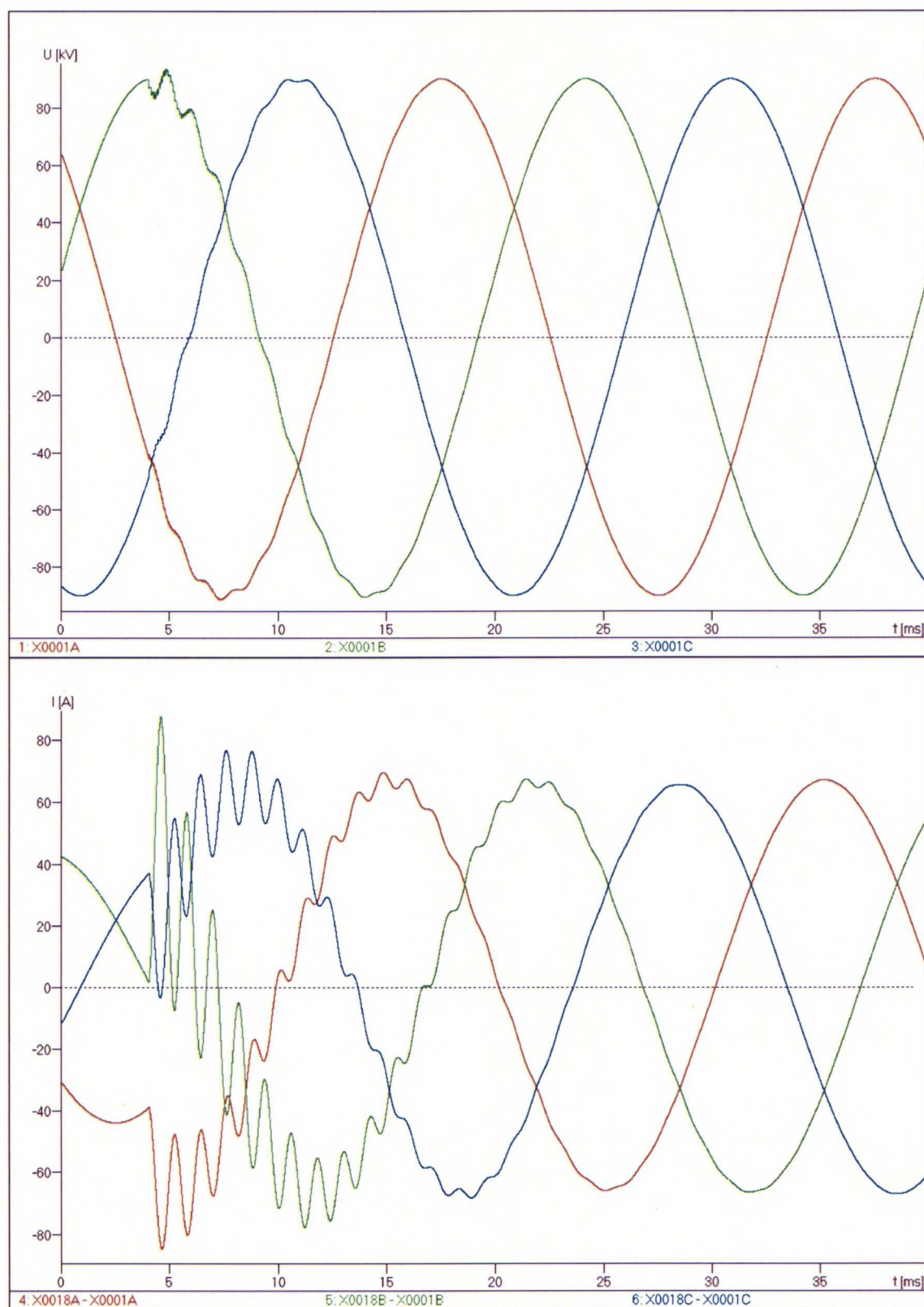
### *Kuorman kytkentä verkkoon*

Kuormia kiinni kytkettäessä voi verkkoon syntyä ylijännitteitä ja -virtoja. Ylijännitteen huippuarvo on riippuvainen jännitteen hetkellisarvosta kytkentähetkellä. Piirin induktanssit ja konduktanssit resonoivat, joka näkyy jännitteen ja virran värähtelynä ennen kuin ne jälleen tasaantuvat. Kuvaan 4.7 on laskettu kuvan 4.9 kaltaiselle verkolle transienttijännitteet tilanteessa, jossa kuristimen perässä oleva kytkin suljetaan, jolloin kuormitettu säteittäinen kaapeli liittyy verkkoon. Kuvaan 4.8 on laskettu vastaavat laskelmat, kun kuorma kytketään verkkoon Pasilan päässä olevalla kytkimellä. Kiinni kytkettäväksi kuormaksi on valittu pieni kuorma, joka on lisäksi kaapelien maakapasitansseista johtuen kapasitiivinen. Mittaukset ovat molemmissa tapauksissa kuristimen luona. Transienttilaskennoissa on käytetty EEUG:n (European EMTP-ATP Users Group Association) ATP (Alternative Transients Program) ohjelmaa. Resonanssitaajuus on verrannollinen piirin induktanssin ja kapasitanssin tulon käänteisluvun neliöjuureen, joten kuristimen koon kasvaessa resonanssitaajuus laskee, mutta vastaavasti transienttijännitteiden suuruus kasvaa.



**Kuva 4.7.** Kuorman kiinnikytkeminen hetkellä 4 ms, vaihe-ero nolla astetta, katkaisija kuristimen jälkeen, mittaus kuristimen jälkeen. Yläpuolinen kuva on jännitemittauksesta alapuolinen virtamittauksesta.





**Kuva 4.8.** Kuorman kiinnityksen hetkellä 4 ms, vaihe-ero 45 astetta, katkaisija kaapelin jälkeen, mittaus kuristimen jälkeen. Yläpuolinen kuva on jännitemittauksesta alapuolinen virtamittauksesta.

Kuvista 4.7 ja 4.8 voidaan nähdä, että myös virtakäyrään tulee kytkettäessä piikkejä, jotka värähtelevät jännitteen kanssa samalla taajuudella (resonanssitaajuus). Virtapiikit johtuvat piirin alkuhetken reaktanssin pienuudesta, kun kapasitanssit eivät ole vielä latautuneet. Kuristimen lisääminen laskee ylivirran suuruutta, koska se nostaa piirin reaktanssin arvoa.

## 4.5 Resonanssit

Kytettäessä kaapelille kuristin, muuttuu verkon kapasitanssi-induktanssi-rinnankytkentä suhteet. Induktanssista ja kapasitanssista syntyvät reaktanssit ovat taajuusriippuvaisia, jolloin tietyllä taajuudella on mahdollista, että niiden suuruudet kumoavat toisensa ja syntyy niin sanottu resonanssi-ilmiö. Reaktanssit voidaan lausua taajuuden avulla

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL, X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (4.11)$$

missä  $X_L$  = piirin induktanssin aiheuttama reaktanssi

$X_C$  = piirin kapasitanssin aiheuttama reaktanssi

$f$  = taajuus

$C$  = kapasitanssi

$L$  = induktanssi.

Resonanssit aiheuttavat verkossa jännitetason vaihtelua, jännitteensäröytymistä, lämpenemistä ja mahdollisesti yliaaltotasojen kasvua, josta voi seurata ylijännitteitä sekä -virtoja. Kuristimen koko tulisi valita siten, ettei resonanssitaajuus satu yliaaltojen läheisyyteen eikä myöskään mahdollisen verkkokäskyohjausjärjestelmän käyttämän lähetystaajuuden läheisyyteen. Tehtävää tekee vaikeammaksi erilaiset mahdolliset kytkentätilanteet, joiden seurauksena resonanssitaajuudet vaihtelevat. /2, 24/

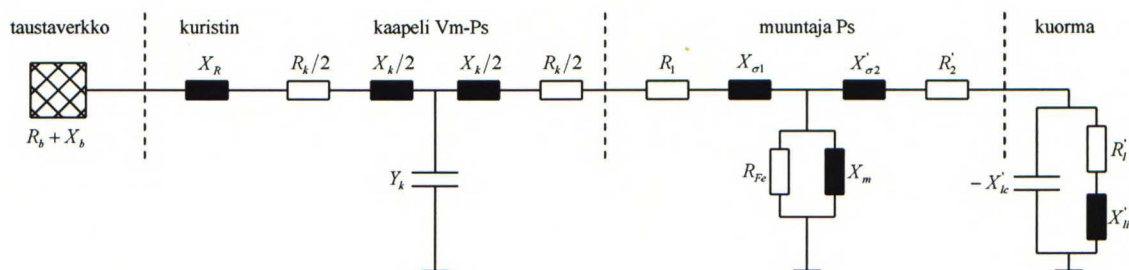
Yliaaltoja suurjänniteverkkoon pääsee keskijänniteverkon kautta (5., 7., 9. ja 11. yliaalto), koska hv/mv muuntajat ovat Yy -kytkentäisiä. Osa pj-verkon yliaalloista (kolmas)

suodattuu pois mv/lv muuntajan kytkentäryhmän Dyn11 seurauksena. Taulukossa 4.9 on esitetty eri yliaaltoja vastaavat taajuudet.

**Taulukko 4.9.** Suurjänniteverkossa vaikuttavien yliaaltojen taajuudet.

yliaalto	taajuus [Hz]
5.	250
7.	350
9.	450
11.	550

Resonanssien laskentaa varten määritellään verkolle erilaisia kytkentätilanteita. Kytkentätilat valitaan siten, että kuristimen lisääminen voisi oletettavasti aiheuttaa resonansseja. Aluksi voidaan päätellä, että resonanssien kannalta hankalimpia ovat ainoastaan tilanteet, joissa väli Viikinmäestä Pasilaan on säteissyötössä. Muutoin induktiivinen reaktanssi on niin pieni, että resonanssit olisivat mahdollisia vain erittäin suurilla taajuuksilla. Verkolle voidaan tällöin tehdä sijaiskytkentä, jossa säteishaara Viikinmäestä Pasilaan päin on kuvattu eri verkossa esiintyvien komponenttien sekä taustaverkko kuvataan yhdeksi tietyn resistanssin ja reaktanssin omaavaksi pisteeksi. Kuvassa 4.9 on esitetty verkon sijaiskytkentä resonansseja laskettaessa.



**Kuva 4.9.** Verkon sijaiskytkentä resonanssilaskuissa.

Alapuoolella on lueteltuna sijaiskytkennän parametrien arvot. Arvojen laskenta on esitetty liitteessä 1.

$$R_b = 0,38 - 3,8 \Omega$$

$$X_b = 2,17 - 21,9 \Omega$$

$$X_R = 5 \Omega \text{ tai } 7 \Omega$$

$$Y_k = 486 \mu S$$

$$R_k = 0,296 \Omega$$

$$X_k = 0,511 \Omega$$

$$R_{Fe} = 0,55 M \Omega$$



$$X_m = 1,11 M\Omega$$

$$R_1 = 0,63 \Omega$$

$$R_2' = 0,63 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = 19,81 \Omega$$

$$X_{\sigma 2}' = 19,81 \Omega$$

$$R_l' = 1836,72 \Omega$$

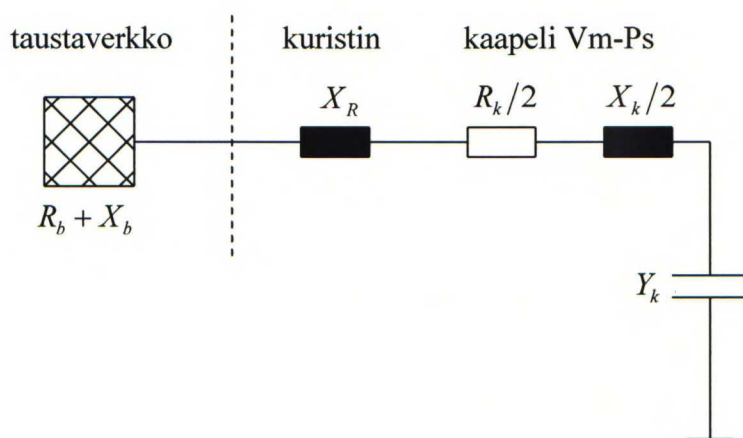
$$X_l' = 3792,83 \Omega$$

Reaktanssit on määritelty 50 Hz taajuudessa. Taustaverkkoa ja kuormaa arvioitaessa on jouduttu tekemään muutamia oletuksia. Taustaverkolle laskennoissa on käytetty arvioituja ääriarvoja, jolloin ns. oikea arvo on jossain niiden välillä. Kuormana on käytetty resonanssien kannalta erittäin hankalaa pientä kapasitiivista kuormaa. Epätarkkuustekijät huomioiden, laskenta tarkkuus voidaan arvioida olevan 20 - 30 prosentin luokkaa.

Määritetään kuvan 4.9 verkolle kolme eri toimintatilannetta.

#### *Kytkeätilanne 1*

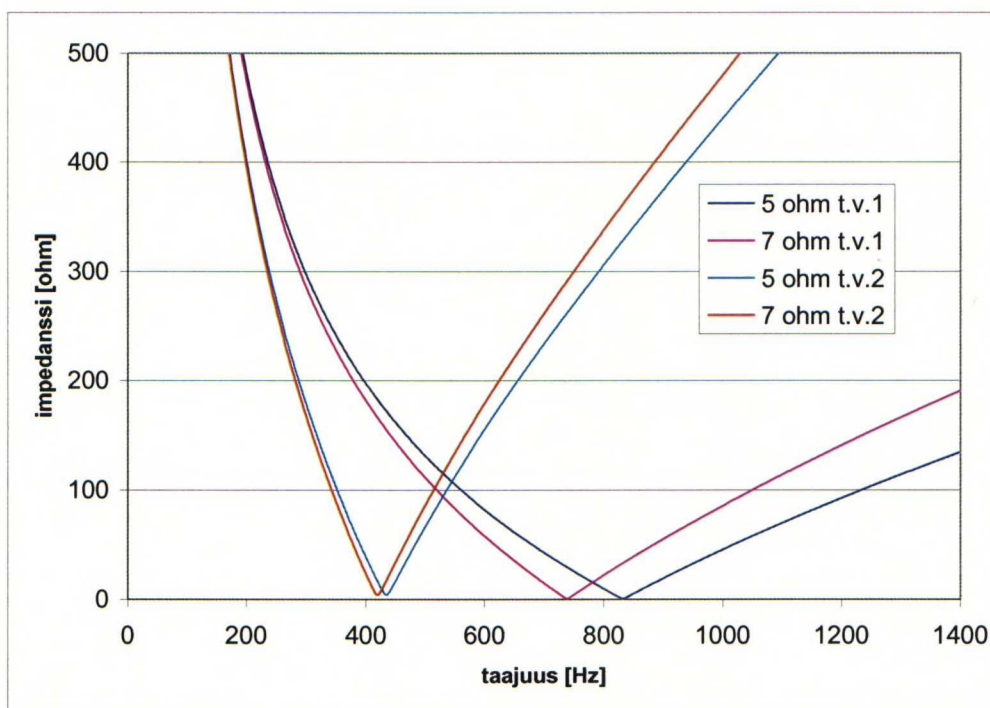
Ensimmäiseksi tutkitaan tilannetta, jossa kaapeli Viikinmäki - Pasila on tyhjäkäynnissä. Virta kulkee tällöin kaapelin maakapasitanssien kautta ja verkolle voidaan tehdä kuvan 4.10 kaltainen sijaiskytkentä.



**Kuva 4.10.** Kytkeätilanne 1.

Liitteessä 2 on ratkaistu verkon sijaiskytkennän impedanssi taajuuden funktiona. Kuvassa 4.11 on piirretty impedanssin kuvaaja taajuuden vaihdellessa välillä 0 - 1400 Hz.

Taustaverkolle (= t.v.) on käytetty kaksia eri laskennallisia ääriarvoja (Liite 1). Kuristimen reaktanssi on 5 ja 7 ohmia 50 hertsin taajuudella.

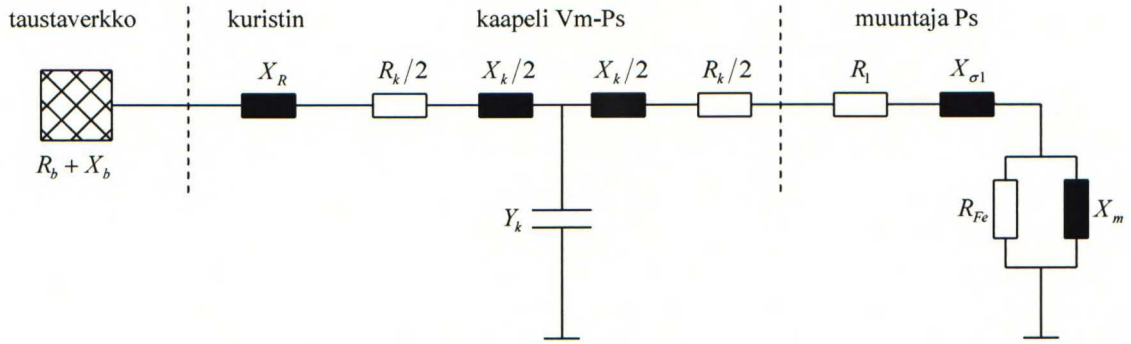


**Kuva 4.11.** KytKentättilanne 1:n impedanssikäyrä taajuuden funktiona.

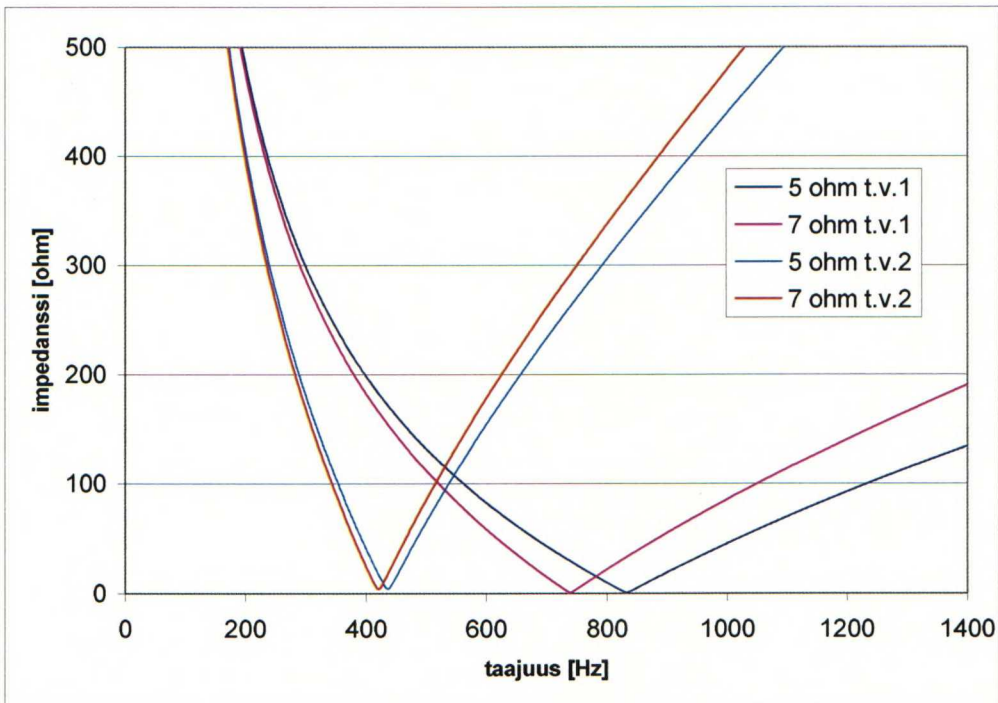
Pienillä taajuuksilla kaapelin maakapasitanssi on hallitsevassa roolissa ja impedanssi on erittäin korkea. Kapasitiivinen reaktanssi on yhtälön 4.11 mukaisesti kääntäen verrannollinen taajuuteen nähden, kun taas induktiivinen reaktanssi on suoraan verrannollinen. Taajuuden kasvaessa impedanssin arvo putoaa nopeasti, kunnes se taas rupeaa verkon induktanssin seurauksena kasvamaan. Taustaverkon resistanssi määrää suurelta osin kuinka alhaalla impedanssi käyrä käy. Resonanssipisteet osuvat käytetyillä parametreilla välille 430 - 840 hertsiä. Voidaan nähdä, että heikolla taustaverkolla yhdeksäs ja yhdestoista yliaalto voivat aiheuttaa resonansseja.

#### *KytKentättilanne 2*

Toinen tutkittava tilanne on esitetty kuvassa 4.12 ja sitä vastaavat impedanssikäyrät kuvassa 4.13. Pasilan toinen muuntaja on tyhjäkäynnissä, toinen on irti.



**Kuva 4.12.** Kytentätilanne 2.



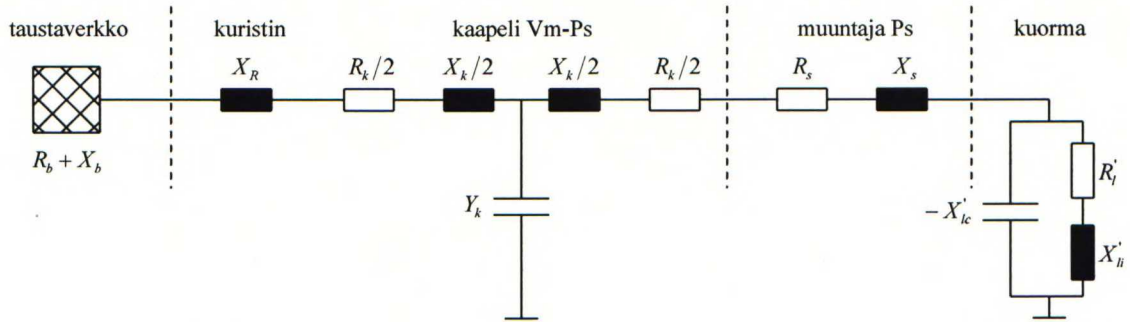
**Kuva 4.13.** Kytentätilanne 2:n impedanssikäyrä taajuuden funktiona.

Impedanssit eri taajuuksilla ovat lähes identtiset kytentätilanne 1:n kanssa. Tämä johtuu kaapelin maakapasitanssista, joka on ainoa maata vasten oleva kapasitanssi. Toinen komponentti, jonka kautta piiri kytkeytyy maahan, on muuntajan magnetointihaara. Magnetointihaaran impedanssi on kuitenkin jo pienilläkin taajuuksilla niin suuri, ettei se juurikaan vaikuta.

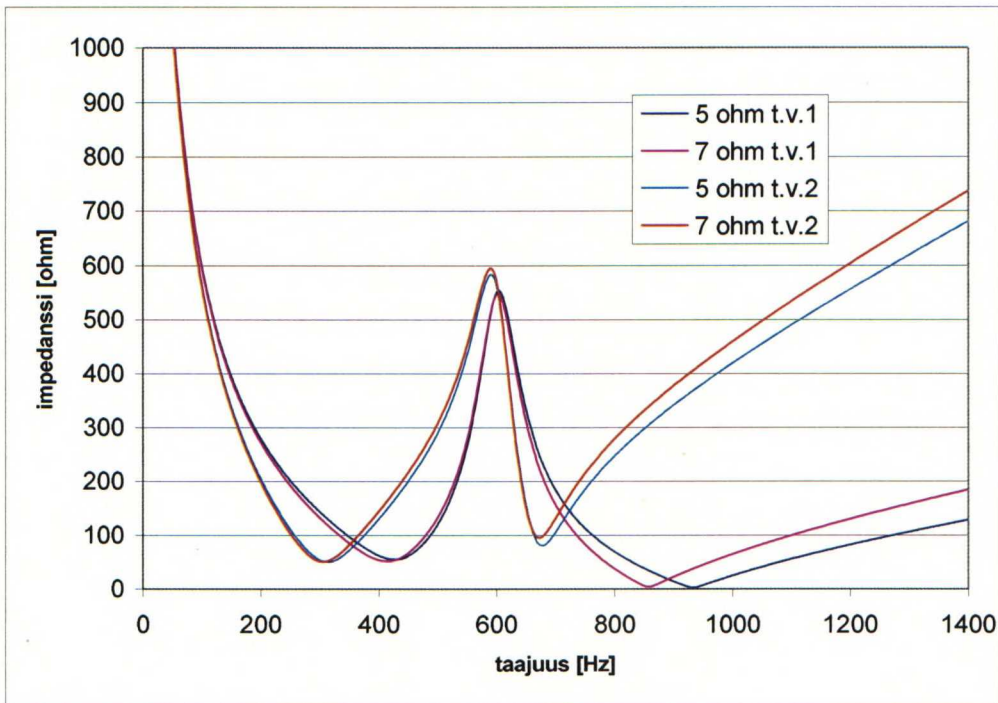


### KytKentättilanne 3

Kolmas tutkittava tilanne on esitetty kuvassa 4.14 ja sitä vastaavat impedanssikäyrät kuvassa 4.15. Pasilan toisella muuntajalla on kuormitusta, toinen on irti. Sijaiskytkenästä on jätetty suuren impedanssinsa takia pois muuntajan magnetointihaara.



**Kuva 4.14.** KytKentättilanne 3.



**Kuva 4.15.** KytKentättilanne 3:n impedanssikäyrä taajuuden funktiona.

Nyt piiri kytkeytyy maahan kahdella eri kapasitanssilla: kaapelin maakapasitanssin ja kuorman, lähinnä kaapeliverkosta johtuvan, kapasitanssin kautta. Tämän seurauksena impedanssikäyrään tulee kaksi notkahdusta. Pienillä taajuuksilla on hallitsevana kuorman kapasitanssi, joka aiheuttaa impedanssin notkahduksen välille 300 - 430 Hz. Tälle

välille osuu seitsemäs yliaalto. Impedanssi ei kuitenkaan käy lähelläkään nollaa, vaan on pienimmilläänkin noin 50 ohmia. Seuraava impedanssin lasku osuu taajuusvälille 670 - 950 Hz. Vahvalla taustaverkolla impedanssi putoaa lähelle nollaa, mutta taajuus on jo niin suuri, että yliaaltopitoisuudet ovat alhaisia.

Tarkastellaan esimerkkinä kytkentätilanteen 2 (kuva 4.12) tyhjäkäyvän muuntajan yli muodostuvia jännitteitä erilaisilla yliaalloilla, kun verkkoon on kytketty viiden ohmin kuristimet. Muuntajan magnetointihaaran impedanssi on niin korkea, että suhteellisen tarkkoihin tuloksiin päästään, jos selvitetään kaapelin maakapasitanssi yli vaikuttava jännite tilanteessa, jossa koko yliaallon aiheuttama virta kulkee sen lävitse. Laskennat suoritetaan sähköalan kansainvälisen järjestön CIGREn (International Council on Large Electric Systems) antamien suositusten mukaisilla yliaaltopitoisuuksien maksimiarvoilla. Yliaalloiksi on valittu 5.-, 7.-, 9.-, 11.- ja 19. harmoninen aalto. Annetun yliaaltopitoisuuden oletetaan vaikuttavan Viikinmäessä, joten taustaverkkoa ei oteta laskennoissa mukaan. Taulukossa 4.10 on esitetty laskennan tulokset sekä käytetyt yliaaltopitoisuudet ja niitä vastaavat jännite- ja virta-arvot esimerkin mukaisessa verkossa.

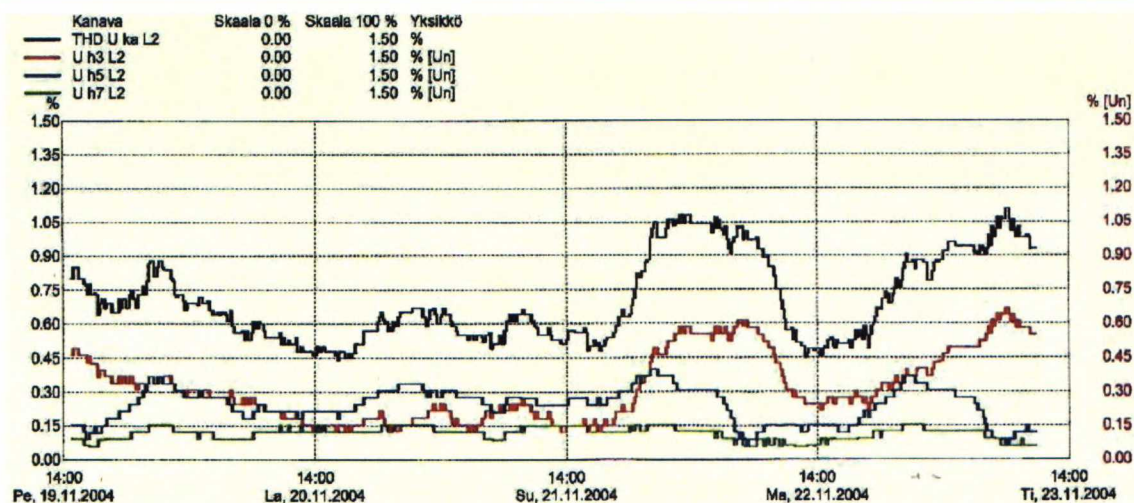
**Taulukko 4.10.** Yliaaltolaskennat.

yliaalto	taajuus [Hz]	max. pitoisuus [%]	jännite [V]	verkon impedanssi [ohm]	virta [A]	jännite muuntajalla [V]
5.	250	2	2300	385	3,4	2460
7.	350	2	2300	257	5,2	2630
9.	450	1	1150	181	3,7	1450
11.	550	1,5	1725	129	7,7	2500
19.	950	1	1150	8	83,0	15570

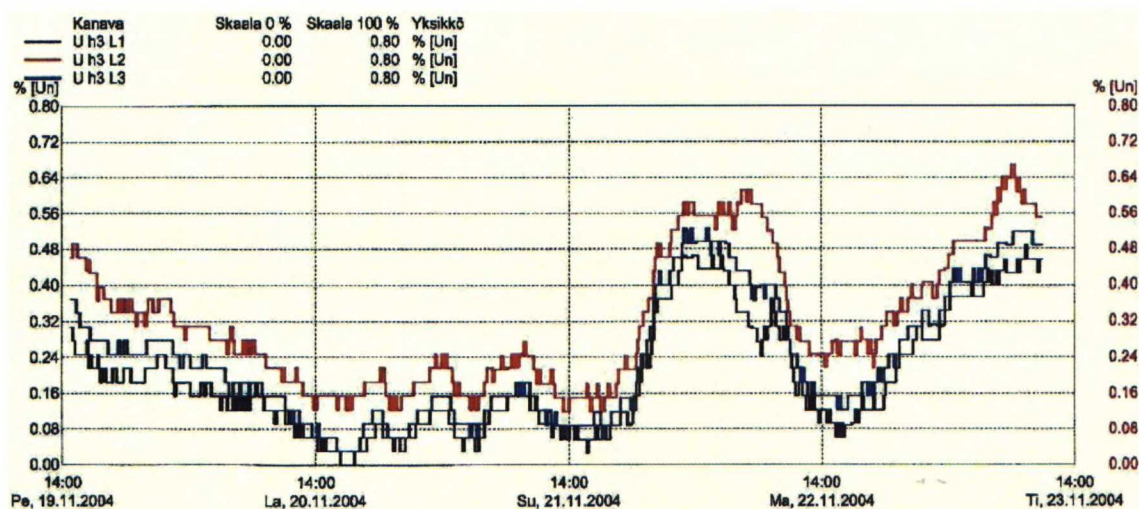
CIGREn ohjeistuksen mukaan, parittomien ei kolmella jaollisten yliaaltojen pitoisuudet saavat olla vielä korkeillakin yliaalloilla suhteellisen suuria. Tämän seurauksena syntyvät ylijännitteetkin korkeille yliaalloille ovat suuria. Todellisuudessa mentäessä ylemmille harmonisille aalloille niiden pitoisuudet putoavat selvästi, jonka seurauksena myös syntyvät ylijännitteet ovat paljon pienempiä. Jännitteen kokonaisharmoniselle särölle on annettu ohjearvoksi alle 3 % /36/.

Viikinmäen sähköasemalla suoritettiin yliaaltomittauksia jännitemuuntajan toisiosta aikavälillä 19.11.2004 - 23.11.2004. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 4.16 - 4.18.

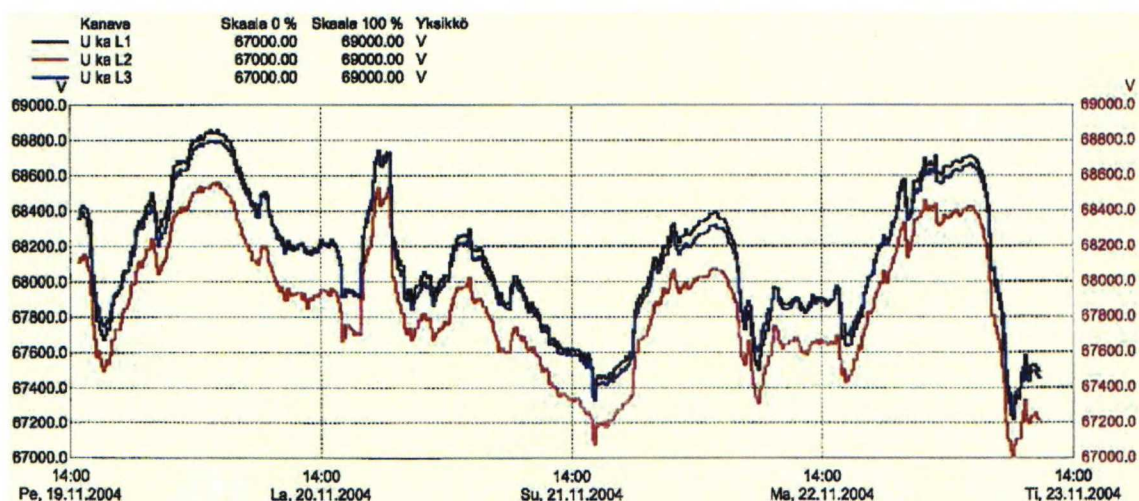




Kuva 4.16. Yliaaltopitoisuudet ja kokonaissärö.



Kuva 4.17. Kolmannen harmonisen yliaallon pitoisuudet eri vaiheissa.



Kuva 4.18. Vaihejännitteiden suuruudet.



Kuvista voidaan todeta, että verkossa on myös kolmatta harmonista yliaaltoa, vaikka aiemmin todettiin, ettei sitä muuntajien kytkentäryhmistä johtuen pitäisi esiintyä. Kyseinen yliaalto pääsee 110 kV:n verkkoon suoraan suurjänniteasiakkailta. Jos laskennat suoritettaisiin mittausten mukaisilla arvoilla, putoaisivat muuntajalle lasketut jännitearvot viidennen yliaallon kohdalta 80 prosentilla ja seitsemännellä yli 90 prosenttia. Korkeampien yliaaltojen, kuten 19. harmonisen yliaallon, osalta pudotus olisi vieläkin selvempi. Kokonaissäröksi on korkeimmillaan saatu hieman yli yhden prosentin luokkaa suuruuksia.

## 4.6 Stabiilisuus

### 4.6.1 Yleistä

Sähkönsiirtojärjestelmälle voidaan määrittää kolme eri stabiilisuuslajia: taajuus-, jännite- ja kulmastabiilisuus. Stabiilisuudessa on kyse tehonsiirrosta verkon kahden eri pisteen välillä. Taajuusstabiilisuudessa olennaista on pätötehon riittävyys verkossa. Kuristin kuluttaa pääasiallisesti loistehoa, joten sillä ei ole vaikutusta taajuuteen. Tosin siirtoverkko on myös yhteydessä kantaverkkoon, joten kyseisen suuruksella verkkomuutoksella ei muutoinkaan ole käytännössä mitään merkitystä taajuuden säilymisen kanssa. Kulmastabiilisuuteen vaikuttaa taas sähköntuotannon stabiilisuus /29/. Jännitestabiilisuudessa kyse on loistehon riittävydestä, joten sitä on syytä tässä yhteydessä tarkastella hieman tarkemmin.

### 4.6.2 Jännitestabiilisuus

Voimansiirtoverkkojen jännitestabiilisuus liittyy läheisesti loistehon ja jännitetason säätöön. Systeemi on jännitestabiili, jos jännite häiriön jälkeen on lähellä normaalitilan jännitettä. Systeemi on epästabiili, kun jännite hallitsemattomasti alenee häiriön, kuormituksen kasvun tai tuotannon pienenemisen seurauksena. /6, 23/

Jännitestabiilisuutta voidaan kutsua myös kuormitusstabiilisuudeksi. Jänniteepästabiilisuudelle luonteenomaista on, että pieniä kuormitusmuutoksia vastaavat suuret jännitteen muutokset, jotka lopulta johtavat stabiilisuuden menettämiseen. Pääsyy tälle on siirtojärjestelmän kykenemättömyys siirtää loistehoa raskaasti kuormitetussa verkos-

sa. Johdon loppupään jännite voidaan lausua kuorman pätö- ja loistehojen sekä johdon reaktanssin avulla seuraavasti /12, 23/

$$U_2 = \sqrt{\frac{(U_1^2 - 2QX) \pm \sqrt{U_1^4 - 4QXU_1^2 - 4P^2X^2}}{2}} \quad (4.12)$$

missä  $U_2$  = johdon loppupään jännite

$U_1$  = johdon alkupään jännite

$Q$  = johdon loppupäässä olevan kuorman loisteho

$P$  = johdon loppupäässä olevan kuorman pätöteho.

Lausutaan vielä loisteho  $Q$  tehokertoimen  $\cos \varphi$  ja pätötehon  $P$  avulla

$$S \cos \varphi = P \quad (4.13)$$

$$S \sin \varphi = Q \quad (4.14)$$

$$\Rightarrow Q = P \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = P \tan \varphi. \quad (4.15)$$

Kuvissa 4.19 ja 4.20 on esitetty kaapelin  $V_m - P_s$  loppupään jännitteet säteittäissyöttötilanteessa pätötehon funktiona tehokertoimen  $\cos \varphi$  ollessa parametrina. Kuristimen reaktansseille on käytetty arvoja  $5 \Omega$  sekä  $7 \Omega$ . Stabiilisuusraja on käyrien huippupiste ( $dP/dU_2 = 0$ ). Kuvasta 4.20 voidaan todeta, että  $7 \Omega$  kuristimella ja tehokertoimella  $\cos \varphi = 0,90_{ind}$  stabiilisuus säilyy vielä noin 540 MW kuormitukseen saakka.  $5 \Omega$  kuristin vastaa reaktanssiltaan noin 16,7 km ja  $7 \Omega$  kuristin noin 23,3 km 2-Duck avojohtoa /13/. Jos kaapelia käytetään sen maksimikuormitusasteella ( $= 600 A$ ), on siirrettävä teho nimellisjännitteellä

$$P = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} \cdot 110kV \cdot 600A \approx 114MW. \quad (4.16)$$

Voidaan nähdä, että stabiilisuusraja ei ole vielä lähellä. Tosin käytännössä toiminta tapahtuu aina stabiilisuuskäyrän aivan alkupäässä.

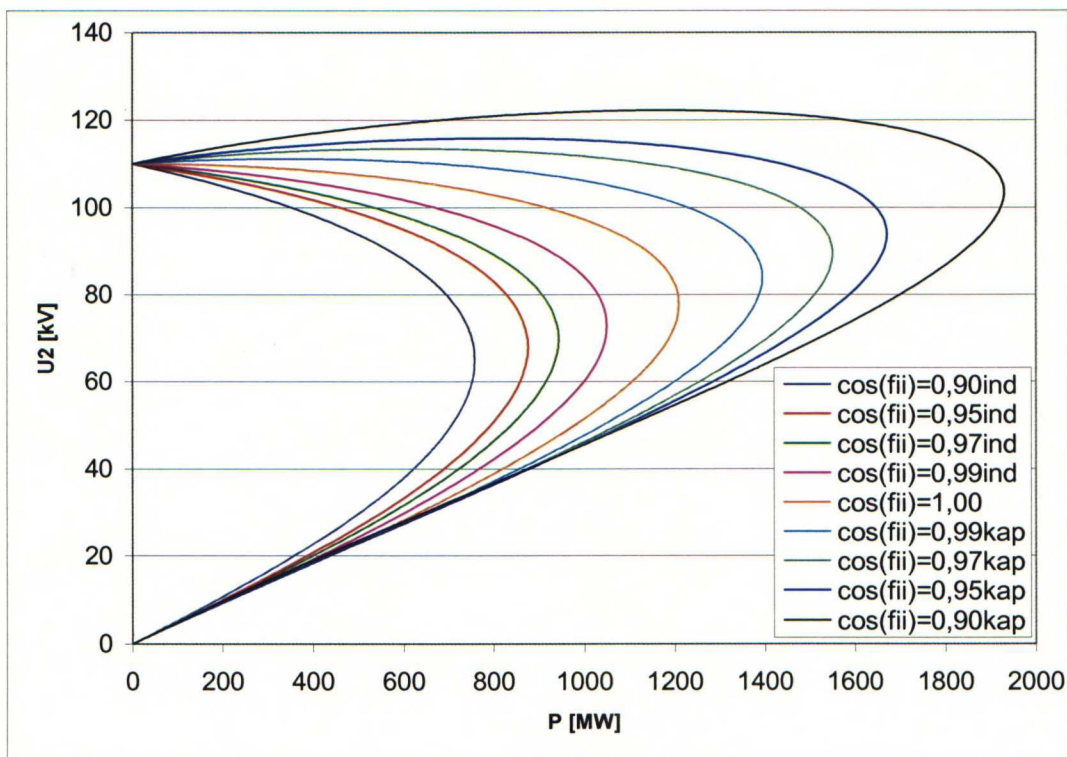
Kuvaan 4.21 on kuvattu vielä mielenkiinnon vuoksi jännitekäyrät  $10 \Omega$ ,  $15 \Omega$  ja  $20 \Omega$  kuristimilla tehokertoimen ollessa  $0,90_{ind}$ .  $10 \Omega$  kuristin näyttäisi vielä olevan mahdol-



linen mutta  $15 \Omega$  alkaa olla jo hieman kriittinen.  $20 \Omega$ :lla joudutaan jo rajoittamaan kuormitusta, jos stabiilisuus halutaan säilyttää.

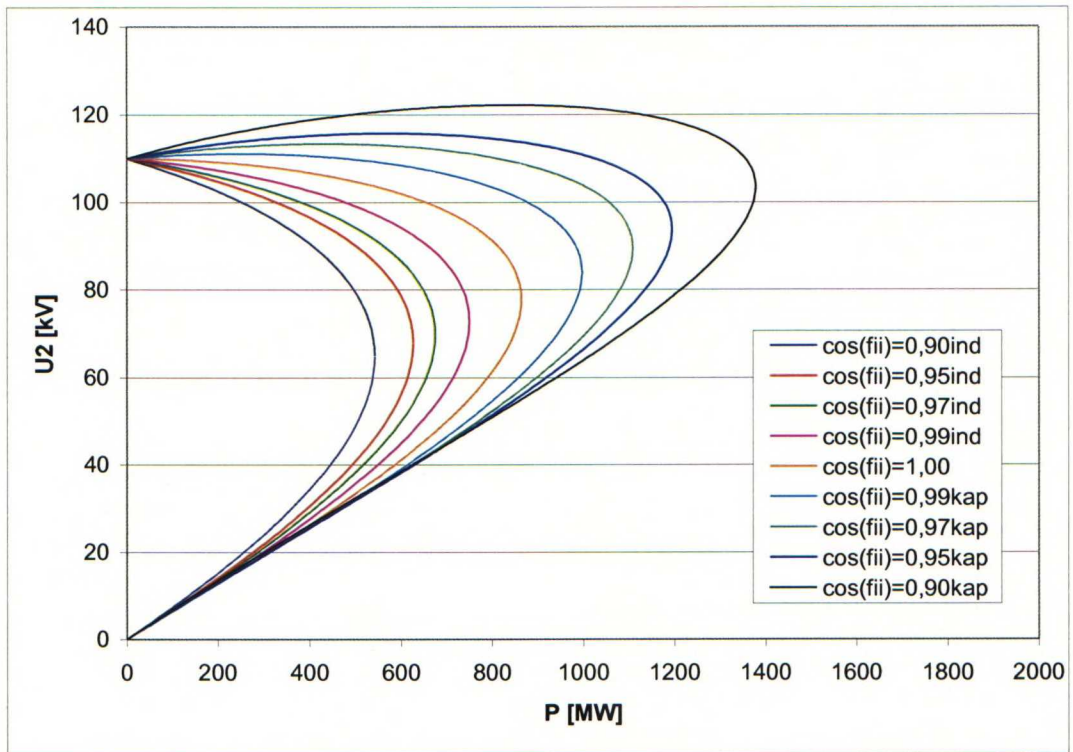
Rengassyötössä kuristimen lisääminen vaikuttaa selvästi vähemmän kuin säteittäissyötössä.

Stabiilisuutta verkossa voidaan arvioida myös tehonjako-ohjelman avulla. Lisätään portaittain verkon rasitusta tutkitussa kohteessa, jolloin pisteessä, jossa laskenta ei enää suppene, on jännitteen romahduspiste ylitetty. Esimerkkinä on laskettu tilanteet välille Vm-Ps-Vl. Kaapelit Vallila-Suvilahti väliltä ovat auki, joten syöttö reitille on säteittäinen. Ensimmäisessä tapauksessa sähköasemien päämuuntajien kuormitus pidetään koko ajan vakiona ( $P_s = 2 \times 32 \text{ MVA}$ ,  $V_l = 2 \times 18 \text{ MVA}$ ) ja kuristimen kokoa säädetään (kuva 4.22) ( $\Rightarrow$  kuristimen tarvitsema loisteho muuttuu), toisessa kuristimen koko on vakio ( $= 7 \Omega$ ) ja kuormitusta säädetään (kuva 4.23). Kuvissa arvioitu romahduspiste sijaitsee käyrän kärjessä. Romahduspisteen löytämistarkkuuden määrää laskentaohjelman tarkkuus. Kuvista voidaan todeta, että kuormitusta lisäämällä jänniteromahdus tapahtuu korkeammalla jännitetasolla kuin jos lisätään pelkästään kuristimen kokoa.

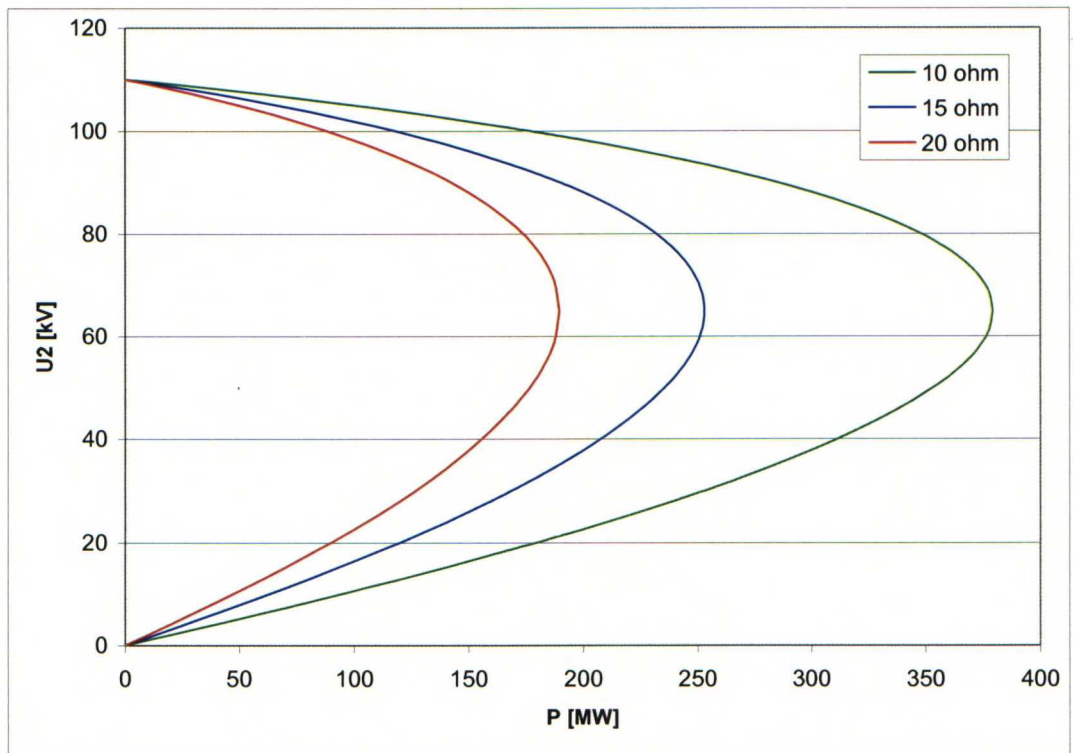


**Kuva 4.19.** Jännitestabiilisuus  $5 \Omega$ :n kuristimella.

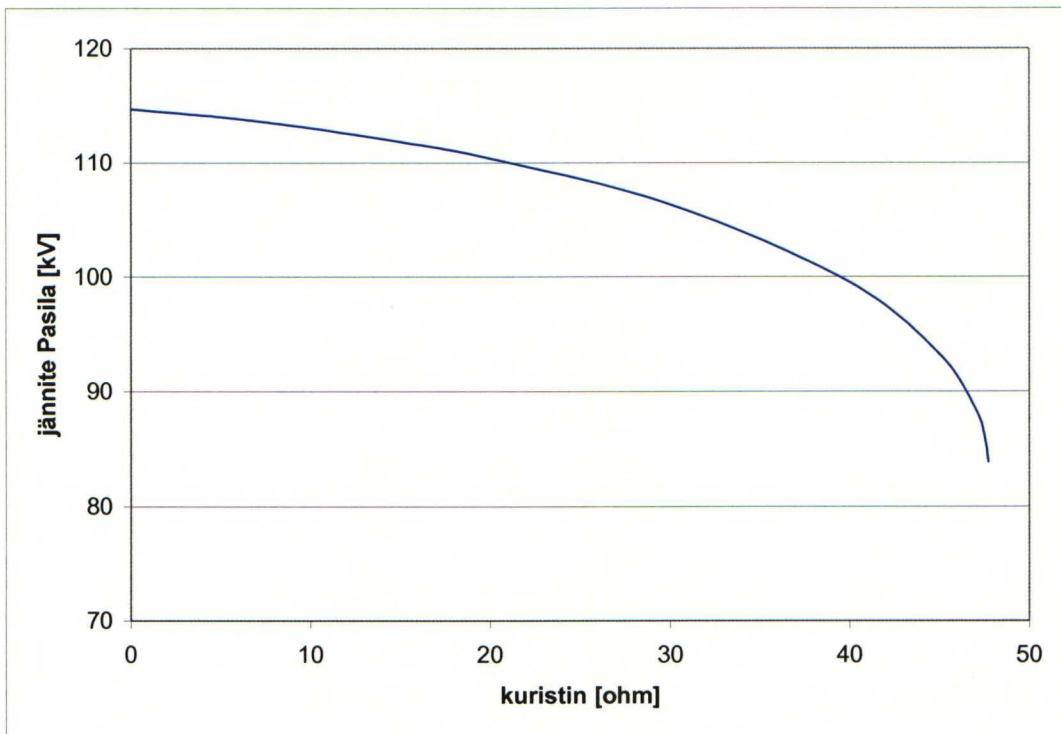




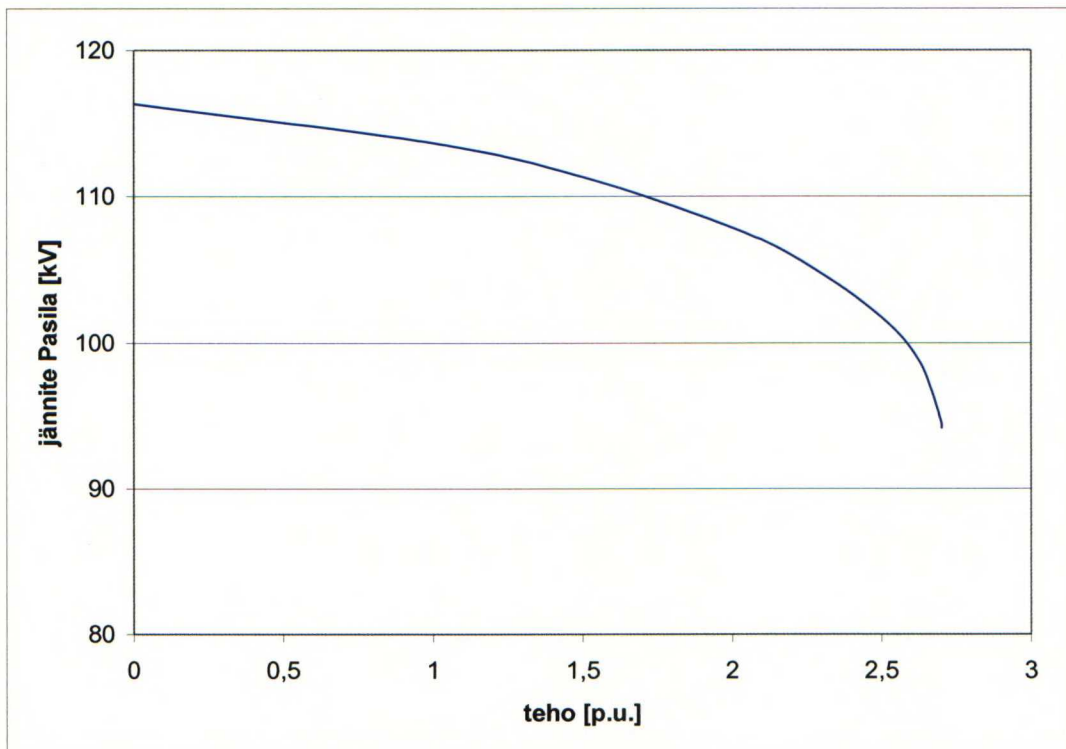
Kuva 4.20. Jännitestabiilisuus 7 Ω:n kuristimella.



Kuva 4.21. Jännitestabiilisuus 10, 15 ja 20 Ω kuristimilla tehokertoimella 0,90ind.



**Kuva 4.22.** Jännitestabiilisuus Pasilan sähköasemalla vakio kuormituksella.

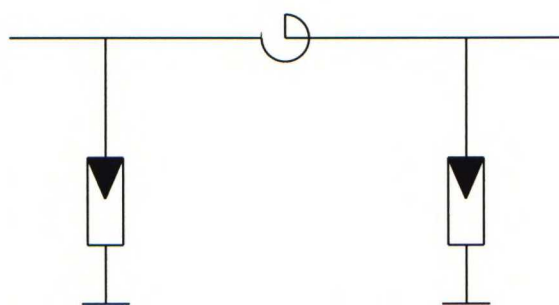


**Kuva 4.23.** Jännitestabiilisuus Pasilan sähköasemalla. Kuristimen koko on vakio ( $= 7\Omega$ ).

## 5 Verkostovaikutukset

### 5.1 Ylijännitesuojaus

Ylijännitesuojien tarkoituksena on rajoittaa kohteessa esiintyvien ylijännitteiden amplitudi vaarattomalle tasolle. Kuvassa 5.1 on esitetty täydellinen ylijännitesuojaus tulevalle syöksyaallolle.



**Kuva 5.1.** Kuristimen täydellinen ylijännitesuojaus venttiilisuojuilla.

Kuvassa esitetty suojaus muodostuu kuristimen molemmilla puolilla maata vastaan olevista suojuista.

Kuristimen yli vaikuttavaa ylijännitesuojaa ei tarvita. Tässä tilanteessa se toimisi ennemminkin ylivirtasuojana, koska nimenomaan virta muodostaa kuristimen yli vaikuttavan jännitteen. Tämä tarkoittaisi sitä, että virran noustessa tietyn tason yläpuolelle kuristin ohitettaisiin suojan kautta. Kuristimella on pikemminkin, esimerkiksi oikosulkuilanteissa, virtaa rajoittava positiivinen toimintapiirre, jota ei haluta ohittaa.

Kaapelilla, jolle kuristin kytketään, on jo ennestään ylijännitesuojat Viikinmäen päässä (126 kV) ja toisessa päässä Pasilan muuntajalla (126 kV) (kuva 4.1). Kuristimen eristystaso on mitoitettu kestäämään 550 kV jännite kuristimen yli ja maata vasten salamaylijännitteille. Kuten luvussa 4.4.1 mainittiin, on ylijännitesuojan suojaustaso ukkosylijännitteitä vastaan 315 kV. Marginaalia heijastuksia varten jää tällöin 235 kV, joka on 75 % suurimmasta mahdollisesta tulevasta aallosta. Heijastus voi vahvistaa jännitteen kuitenkin kaksinkertaiseksi, joten ylijännitesuojien suojaustasoa tulee ainakin Viikinmäen puolella parantaa tai sitten asentaa erilliset suojat kuristimien Viikinmäen



puoleisien kaapelipäätteiden yhteyteen. Pasilan suunnalta tulevat syöksyaallot vaimenevat jo niin paljon ettei niistä ole vaaraa.

## 5.2 Käyttö

Normaalissa käyttötilanteessa, kun verkko on kytketty renkaaseen, ei kuristimista aiheudu merkittäviä vaikutuksia. Säteilittäissyöttötilanteessa vaikutukset ovat jo selvästi suurempia mm. jännitteenaleneman, vikavirran ja häviöiden suhteen. Edellä mainittuja vaikutuksia on käsitelty tarkemmin seuraavissa luvuissa. Ratkaistavaksi tulee halutaan-ko kuristin pitää jatkuvasti kiinni verkossa vai pitääkö se pystyä ohittamaan ohituskyt-  
kennän avulla.

Kuristimen perimmäinen käyttötarkoitus on, ettei säteilittäissyöttöä jouduttaisi enää käyttämään. Käytännössä säteilittäissyöttötilanteeseen jouduttaisiin ainoastaan kaapelia huollettaessa tai vian siihen sattuessa, koska ylikuormitusta ei pitäisi enää syntyä. Kuristimien huolto tai vikatilanne voi aiheuttaa ohituskytkentätarpeen, jos kaapeliyhteys halutaan samalla pitää käytössä. Edellä mainitut poikkeustilanteet voidaan katsoa olevan niin harvinaisia, että ohituskytkentä erottimien ja katkaisijoiden avulla tuskin on kannattava. Sen sijaan ohituskytkentä voitaisiin toteuttaa kuristimen ohittavalla jompillä. Jomppien kytkentä aiheuttaisi lyhyen katkon, kun kaapeli joudutaan kytkemään jännitteettömäksi, mutta on ratkaisuna edullinen ja tilaa säästävä. Seuraavissa luvuissa käsiteltävät verkostovaikutukset näyttäisivät olevan vielä niin alhaiset, etteivät ne aiheuta tarvetta lisätoimenpiteille kuristimen käytön suhteen.

## 5.3 Jännitteenalenema

Kuristimen lisäämisestä verkkoon aiheutuu jännitehäviöitä. Suurimmillaan vaikutukset ovat silloin, kun Pasilan sähköasema on säteilittäissyötössä. Seuraavassa tarkastellaan syntyvien jännitehäviöiden suuruutta.

Johdon alkupään jännite voidaan lausua johdon loppupään jännitteen ja johdossa syntyvän jännitehäviön avulla seuraavasti

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{U}_h \quad (5.1)$$

$$\underline{U}_h = \underline{I} \cdot \underline{Z} \quad (5.2)$$

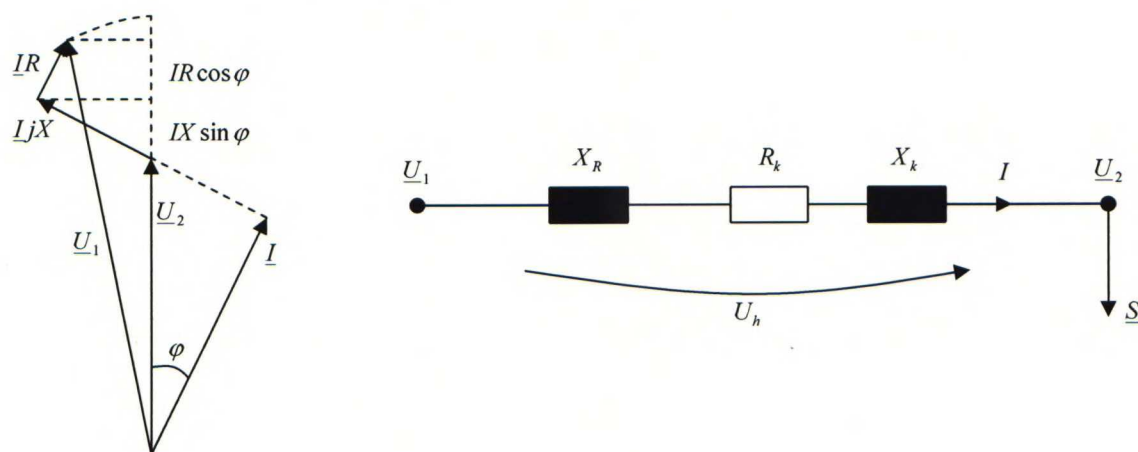
missä  $U_1$  = johdon alkupään jännite  
 $U_2$  = johdon loppupään jännite  
 $U_h$  = jännitehäviö.

Lisättäessä johdon Viikinmäki - Pasila (0,73 km AHXLMK800 + 3,77 km OHPLKM400) kanssa sarjaan kuristin, tulee kuristimen reaktanssi ( $5 \Omega$  tai  $7 \Omega$ ) summa-  
 ta johdon arvoihin. Kokonaisimpedanssiksi saadaan kuristimen koosta riippuen

$$\underline{Z}_{5\Omega} = (0,296 + 0,511j + 5j)\Omega = (0,296 + 5,511j)\Omega = (5,519 \angle 86,93^\circ)\Omega$$

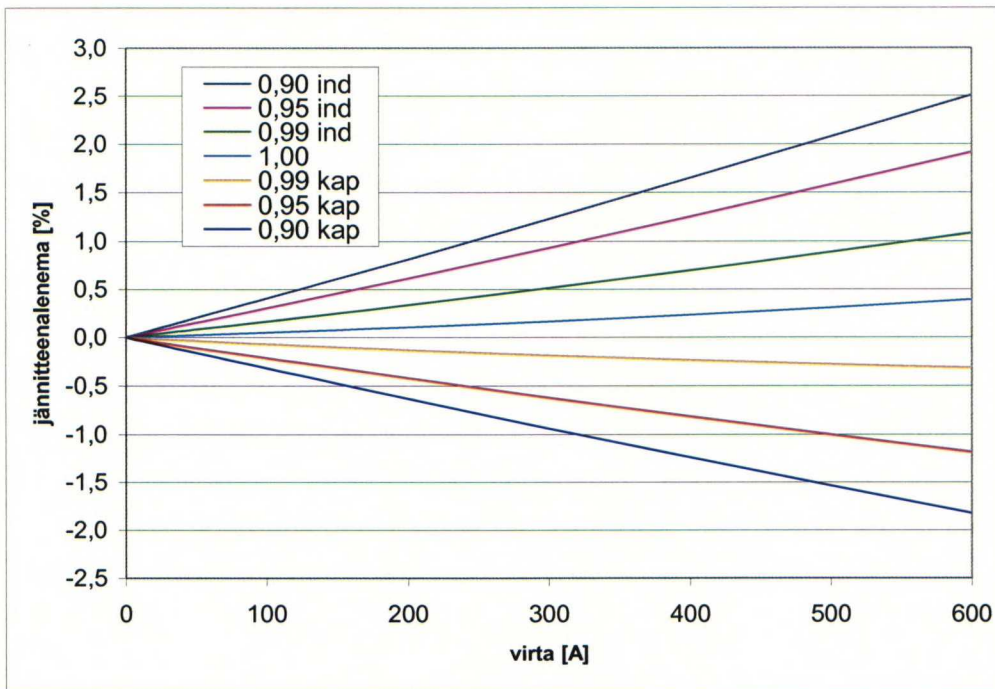
$$\underline{Z}_{7\Omega} = (0,296 + 0,511j + 7j)\Omega = (0,296 + 7,511j)\Omega = (7,517 \angle 87,74^\circ)\Omega.$$

Kuvassa 5.2 on esitetty kaapelin alku- ja loppupään jänniteosoittimet säteittäissyöttötilanteessa, kun kaapelille on lisätty kuristin.

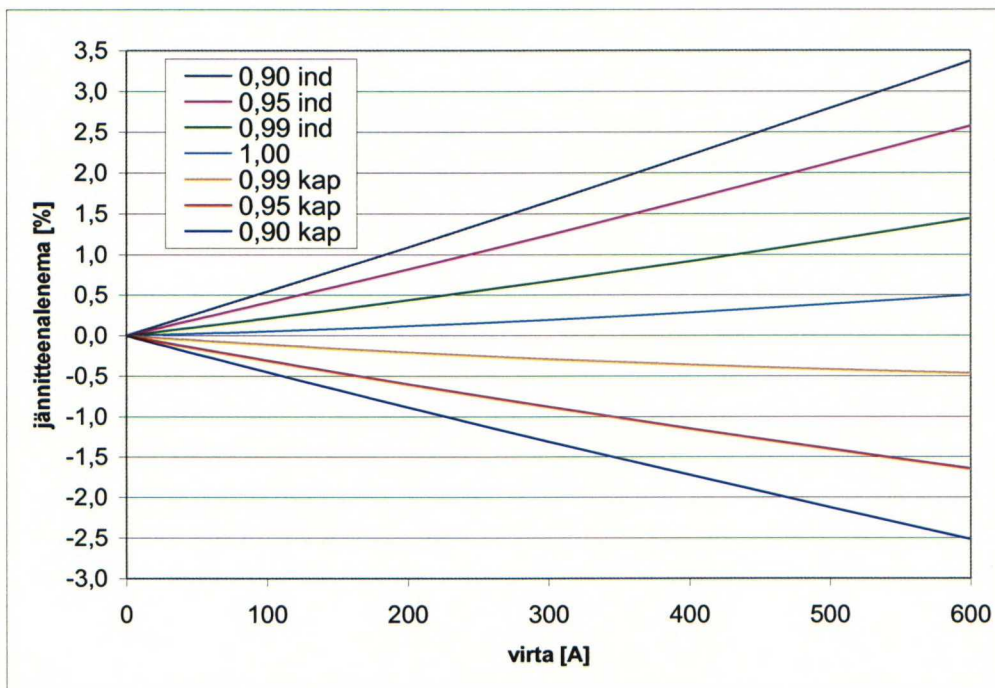


**Kuva 5.2.** Johdon alku- ja loppupään jänniteosoittimet.

Annetaan virran arvon vaihdella koko kaapelin kuormitettavuuden rajoissa (= 0 - 600 A)  $\cos \varphi$ :n eri arvoilla.



**Kuva 5.3.** Jännitteenalenemat virran funktiona tehokertoimen eri arvoilla. Kuristin  $5 \Omega$ .



**Kuva 5.4.** Jännitteenalenemat virran funktiona tehokertoimen eri arvoilla. Kuristin  $7 \Omega$ .

Käytännön maksimikuormitus tilanne säteissyöttötilanteessa voidaan arvioida olevan silloin, kun Pasilan sähköaseman molemmat muuntajat (40 + 40 MVA) ovat 20 %:n ylikuormassa. Tällöin kuormitusvirta on



$$I_{\max} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1,2 \cdot 80 MVA}{\sqrt{3} \cdot 115 kV} = 482 A \quad (5.3)$$

missä  $I_{\max}$  = maksimivirta  
 $S_{\max}$  = maksiminäennäisteho.

Kuvista 5.3 ja 5.4 nähdään, että tilannetta vastaava jännitteenalenema on viiden ohmin kuristimella, tehokertoimen ollessa 0,9ind, noin 2,0 % ja seitsemän ohmin 2,7 %. Kulmaeroa johdon alku- ja loppupään jännitteiden välille syntyy kuristimen koosta riippuen 2 - 3 astetta.

Tyypillinen kuormitusaste muuntajille on noin 50 prosenttia, jolloin kuormitusvirraksi saadaan

$$I = \frac{S_{50\%}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{0,5 \cdot 80 MVA}{\sqrt{3} \cdot 115 kV} = 201 A \quad (5.4)$$

missä  $S_{50\%}$  = 50 % näennäisteho.

Vastaavat jännitteenalenemat ovat 0,8 - 1,1 % ja kulmaerot alku- ja loppupään jännitteiden välillä 1,0 - 1,3 astetta.

## 5.4 Vaikutus vikavirtaan

Oikosulkuvirtoja lasketaan ohjelmiston avulla, mutta niiden suuruusluokkaa voidaan arvioida Thevenin'in teoreemalla /2/

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_f + \underline{Z}_i} \quad (5.5)$$

missä  $\underline{I}$  = vikavirta  
 $\underline{U}_v$  = vikapaikan jännite ennen vikaa  
 $\underline{Z}_f$  = vikaimpedanssi  
 $\underline{Z}_i$  = verkon impedanssi vikapaikasta nähtynä.

Teoreemasta voidaan todeta, että vaikuttamalla verkon impedanssiin, muuttuu vikavirta. Kuristimen lisääminen nostaa hieman verkon impedanssia varsinkin kuristimen sijoituspaikan läheisyydessä. Tämän seurauksena vikavirrat putoavat, mitä voidaan pitää hyvänä asiana. Taulukkoon 5.1 on laskettu sähköasemien 3-vaiheiset summaoikosulkuvirrat silmukoidussa verkossa erisuuruisilla kuristimilla ja ilman kuristinta verkostolaskentaohjelmiston avulla. Laskennoissa voimalaitokset ovat Kellosaarta lukuun ottamatta käynnissä ja kaikki Helsingin Energian sisäiset yhteydet sekä yhteydet 400 kV:n verkoon ovat kiinni.

**Taulukko 5.1.** Sähköasemien summaoikosulkuvirrat talvikaudella.

Sähköasema	silmukoitu $\Sigma I_k''$ [kA]	kuristimet			
		3Ω	5Ω	7Ω	10Ω
Herttoniemi	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6
Kamppi	23,8	23,3	23,2	23,2	23,2
Kannelmäki	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
Kasarmitori	24,3	23,8	23,7	23,6	23,6
Kruununhaka	24,8	24,2	24,1	24,0	24,0
Laajasalo	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
Meilahti	21,1	21,0	21,0	21,0	21,0
Mellunkylä	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
Myllypuro	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
Pasila	24,7	22,7	22,4	22,3	22,1
Pitäjänmäki	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Punavuori	23,9	23,4	23,3	23,3	23,3
Salmisaari	24,7	24,4	24,3	24,2	24,2
Suurmetsä	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7
Suvilahti	25,7	25,0	24,9	24,8	24,8
Tapanila	20,3	20,1	20,1	20,1	20,1
Töölö	23,9	23,4	23,3	23,3	23,2
Vallila	25,2	24,0	23,8	23,7	23,6
Viikinmäki	25,9	25,3	25,2	25,2	25,1
Vuosaari	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0

Taulukosta nähdään, että verkon ollessa silmukoitu, kuristimen lisääminen Viikinmäkeen laskee oikosulkuvirtaa enimmillään noin kaksi kiloampeeria. Taulukkoon 5.2 on oikosulkuvirrat laskettu tilanteelle, jossa Pasilan sähköasema on säteittäissyötössä. Laskennat on suoritettu ainoastaan Pasilan ja Viikinmäen sähköasemille, joista Viikinmäkikin on mukana ainoastaan havainnollistamassa, että kuristimen lisääminen ei tällöin vaikuta muuhun verkkoon.

**Taulukko 5.2.** Sähköasemien Pasila ja Viikinmäki summaoikosulkuvirrat talvikaudella säteittäissyöttötilanteessa.

Sähköasema	säteittäinen $\Sigma I_k''$ [kA]	kuristimet			
		3Ω	5Ω	7Ω	10Ω
Pasila	20,4	10,4	7,8	6,3	4,9
Viikinmäki	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0

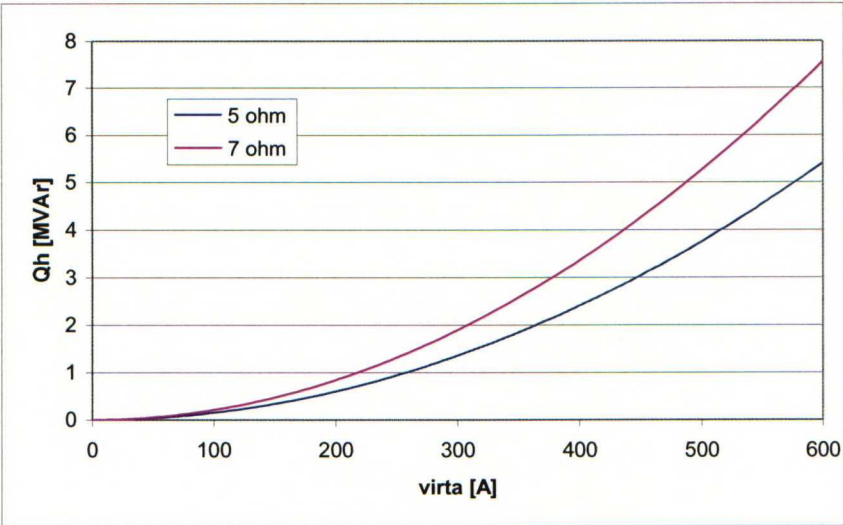
Säteittäissyöttötilanteessa kuristimen taakse jäävillä sähköasemilla vikavirrat putoavat huomattavan paljon. Aiemmin luvussa 4.3 laskettiin tietyillä olettamuksilla alin mahdollinen oikosulkuvirta säteissyötössä Pasilan sähköasemalla, tulokseksi saatiin 2,4 kA viiden ohmin kuristimella.

5.5 Häviöt

Kuristimet kuluttavat sekä loistehoa että pätötehoa. Loistehohäviöitä aiheutuu kuristimen reaktanssista ja läpi kulkevasta virrasta riippuen seuraavasti

$$Q_h = 3XI^2 \tag{5.6}$$

- missä      $Q_h$     = loistehohäviö  
               $X$        = reaktanssi  
               $I$        = virta.



**Kuva 5.5.** Kuristimessa syntyvät loistehohäviöt.



Kuvaan 5.5 on laskettu loistehohäviöt virran funktiona. Virran arvot vaihtelevat koko kaapelin Viikinmäki - Pasila kuormitettavuuden rajoissa.

Maksimi siirrettäväteho on

$$S_{\max} = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} \cdot 110kV \cdot 600A = 114,3MVA. \quad (5.7)$$

Kaapelin maakapasitansseista syntyvä loisteho kompensoi loishäviöitä. Pienen kuormituksen aikaan on hyvä, että loistehoa kulutetaan kuristimissa. Suurella kuormituksella saatetaan kuristimen loistehoja joutua kompensoimaan erillisillä kompensointilaitteilla.

Pätötehohäviöitä syntyy valmistajan antamien tietojen mukaan yhdessä käämissä 32,8 kW 800 A:n virralla. Tiedoista voidaan ratkaista kuristimen resistanssi seuraavasti.

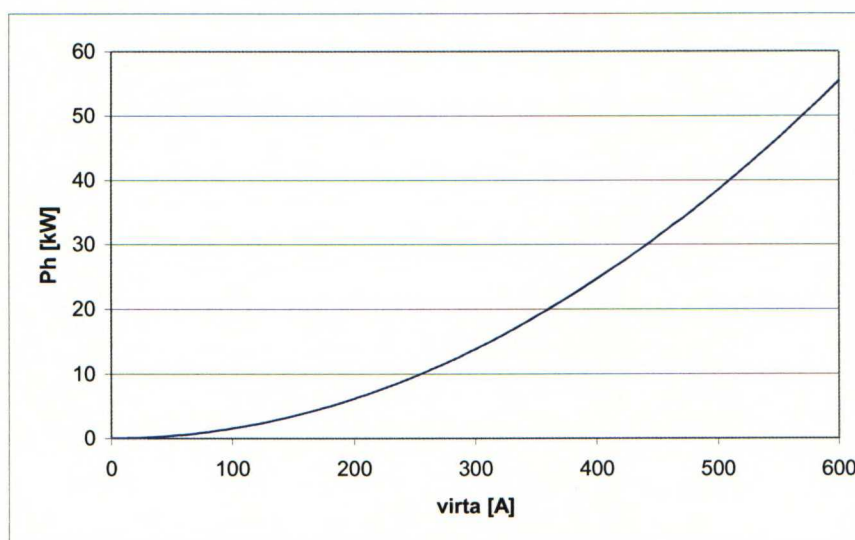
$$\begin{aligned} P_h &= 3RI^2 \\ \Rightarrow 3R &= \frac{P_{h800A}}{I^2} = \frac{3 \cdot 32,8kW}{(800A)^2} = 0,154\Omega \\ \Rightarrow R &= 51,3m\Omega \end{aligned} \quad (5.8)$$

missä  $P_h$  = pätötehohäviö

$R$  = resistanssi

$I$  = virta.

Kuvaan 5.6 on piirretty pätötehohäviöistä kuvaaja virran funktiona.



**Kuva 5.6.** Kuristimessa syntyvät pätötehohäviöt.

Luvussa kahdeksan on arvioitu pätö- ja loistehohäviöistä syntyviä kustannuksia.

## 6 Ympäristövaikutukset

Kuristimista syntyy myös joitakin ympäristövaikutuksia. Seuraavissa luvuissa on käsitelty magneettikenttävaikutuksia sekä syntyviä äänitasoja tämän hetkisten säädösten kannalta.

### 6.1 Magneettikenttä

Kuristimen läpi kulkeva virta aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Kuristimista aiheutuvat magneettikentät ovat huomattavasti normaaleista voimansiirtojohdoista tai sähköasemista aiheutuvia kenttiä suurempia. Esimerkkinä voidaan ottaa 110 kV:n siirtojohto, jonka alla oleva magneettivuon tiheys on suuruusluokaltaan alle 5  $\mu\text{T}$  /34/, kuristimista aiheutuva magneettivuon tiheys kolmen metrin etäisyydellä on vielä noin 500  $\mu\text{T}$ . Magneettivuon tiheys on magneettikentän voimakkuudesta ja väliaineen permeabiliteetistä riippuva suure.

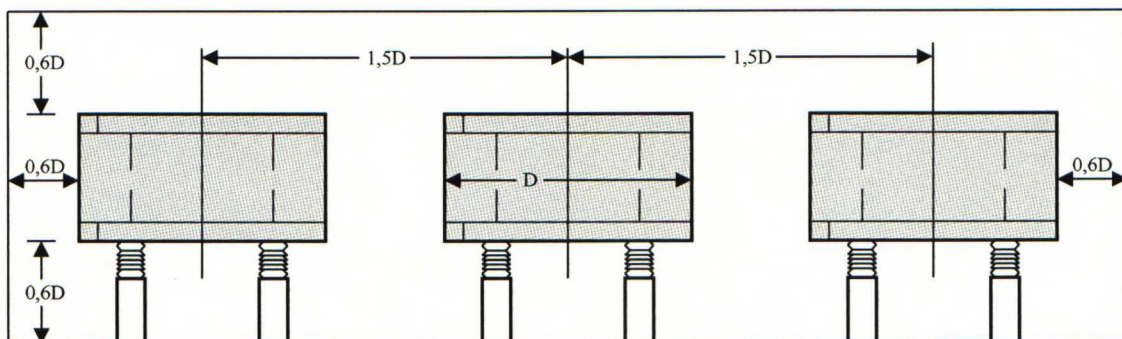
$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (6.1)$$

missä  $B$  = magneettivuon tiheys  
 $H$  = magneettikentän voimakkuus  
 $\mu$  = väliaineen permeabiliteetti  
 $\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti  
 $\mu_r$  = väliaineen suhteellinen permeabiliteetti.

Seuraavissa luvuissa on kerrottu magneettikentän vaikutuksista ja miten kentän suuruuksiin voidaan vaikuttaa.

#### 6.1.1 Termiset vaikutukset

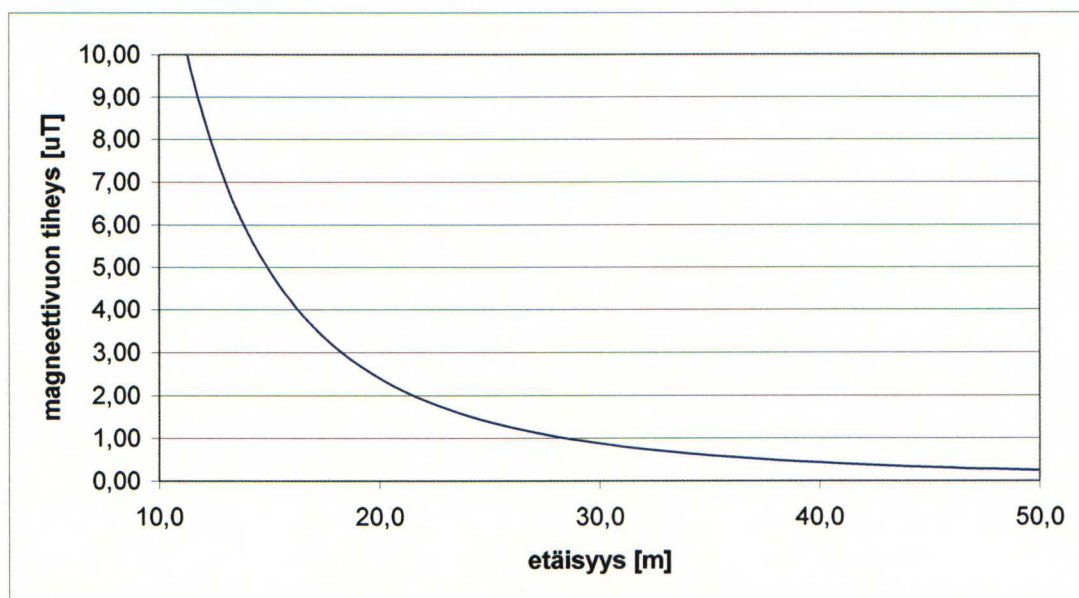
Magneettikentät aiheuttavat ympärillä oleviin metalliosiin virtoja. Virrat lämmittävät osia varsinkin, jos ne muodostavat silmukoita. Kuvassa 6.1 on esitetty asennusetäisyyksiä erilaisiin metalliosiin ja toisiin kuristimiin suhteessa kuristimen halkaisijaan siten, että magneettikentän vaikutukset ovat jo riittävän alhaisia. Tarkemmat asennusetäisyydet on esitetty luvussa 7.



**Kuva 6.1.** Minimi etäisyydet toisiin kuristimiin ja sellaisiin metalliosiin jotka eivät muodosta suljettuja silmukoita. (Silmukoita muodostavien metalliosien täytyy olla noin kaksikertaa kauempana.) /14/

### 6.1.2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC)

Magneettikentät aiheuttavat häiriötä erilaisille elektronisille laitteille. EMC-standardeissa määritellään magneettikenttäsietoisuuden raja-arvoja. Esimerkkinä voidaan ottaa näyttöpäätte, jonka standardin mukainen sietoisuusraja on  $1,26 \mu\text{T}$ . CRT-tekniikalla toteutetut tietokoneen näytöt ovat herkkiä magneettikentille, mutta ovat hyvin yleisiä kotitalouksissa.



**Kuva 6.2.** Magneettivuon tiheyden vaimeneminen.

Kuvaan 6.2 on laskettu kuristimista aiheutuvia magneettivuon tiheyksiä etäisyyden funktiona kuormitusvirran ollessa 600 A. Laskennat perustuvat Fortumin Porvoon jalos-



tamolla tutustumiskäynnin yhteydessä tehtyihin mittauksiin kuristimien magneettikentistä.

Yhden mikrotieslan raja alittuu hieman ennen 30 metriä. Pihoihin on matkaa noin 40 metriä ja lähimpään talon seinään noin 45 metriä, joten taustamagneettikentälle ja virhemarginaalille jää vielä varaa.

### 6.1.3 Terveydelliset vaikutukset

Magneettikenttien mahdollisia vaikutuksia ihmisiin on tutkittu eri puolilla maailmaa 1980-luvulta lähtien. Tutkimuksissa ei ole saatu näyttöä siitä, että magneettikentät aiheuttaisivat fyysisiä tai psyykkisiä sairauksia tai sähköyliherkkyydeksi nimettyjä oireita.

/32/

Magneettikenttien osalta on kuitenkin yleisesti käytössä Euroopan Unionin antamat varovaisuusperiaatteen mukaiset suositukset magneettikentän vuon tiheyden suuruuksista. Suositukset perustuvat kansainvälisen komission ICNIRP:n (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) antamiin ohjearvoihin.

**Taulukko 6.1.** ICNIRP:n antamat ohjeistukset kenttien raja-arvoista. /33/

	European power frequency		Mobile phone base station frequency		Microwave oven frequency
Frequency	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
	Electric field (V/m)	Magnetic field (μT)	Power density (W/m <sup>2</sup> )	Power density (W/m <sup>2</sup> )	Power density (W/m <sup>2</sup> )
Public exposure limits	5 000	100	4.5	9	10
Occupational exposure limits	10 000	500	22.5	45	

Taulukosta 6.1 voidaan todeta, että yleisölle annettu ohjearvo jatkuvalle altistamiselle on 100 μT ja työntekijälle 500 μT.

Yhdestä kuristimesta aiheutuva magneettivuon tiheys sivusuunnassa laskee alle 500 μT 3,0 m:n etäisyydellä ja alle 100 μT 5,8 m:n etäisyydellä kuristimesta. Vastaavat arvot

pystysuunnassa ovat 4,1 m ja 7,7 m. Magneettivuon tiheydet on laskettu kuristimien mitoitustavirralle 800 A, joten kun kaapelin maksimikuormitusvirta on 600 A, eivät vuon tiheydet ole aivan edellä mainitun suuruisia. Alueet tulee aidata siten, että yleisö ei pääse liian lähelle kuristimia. Kuristimet tulee lisäksi asentaa jalustan avulla riittävän korkealle, jotta työntekijöille kohdistuva vuontiheys laskee alle suositusarvon.

#### 6.1.4 Häiriöjännitteet

Kuristimista syntyvä magneettikenttä voi aiheuttaa häiriöjännitteitä viereisiin johtimiin. Häiriöjännite on verrannollinen kuristimessa kulkevaan virtaan sekä kuristimen ja johtimen keskinäisinduktanssiin seuraavasti

$$|u_h| = \omega M_{Rj} I_R \quad (6.2)$$

missä  $u_h$  = häiriöjännite  
 $\omega$  = kulmataajuus  
 $M_{Rj}$  = keskinäisinduktanssi  
 $I_R$  = kuristimen virta.

Keskinäisinduktanssin suuruutta on vaikea arvioida, mutta kuristimien vieressä olevalle 110 kV:n kytkinkentälle häiriöjännitteellä ei ole vaikutusta. Häiriöjännitteet tulisivat ongelmaksi lähinnä tietoliikennejohdoissa, jos ne kulkisivat kuristimien vierellä.

#### 6.1.5 Kiertovirrat

Magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virran suuruuteen. Mitattaessa tämänhetkinen magneettivuon tiheys kuristimien asennuspaikalla, voidaan arvioida mikä on kiertävä virta kuristimissa kytkinkentästä johtuen. Huomioitava on lisäksi magneettikentänsuunta, jonka täytyisi kulkea kuristimien läpi, jotta niihin muodostuisi virtoja. Oletetaan, että noin puolet nykyisestä magneettikentästä aiheuttaa kuristimissa kiertovirtoja. Kuristin aiheuttaa 800 A:n virralla 3 mT magneettikentän 1,2 m:n etäisyydelle. Arvioidaan, että kuristimen pinnalla magneettikentän voimakkuus olisi noin satakertainen, eli 300 mT. 110 kV Kytkinkentän aiheuttama magneettivuon tiheys kytkinkentällä on 1 - 30  $\mu\text{T}$  /34/. Kuristimien etäisyydelle voidaan magneettivuon tiheyden

arvioida olevan suuruusluokaltaan alle  $10 \mu\text{T}$ . Puolet siitä on  $5 \mu\text{T}$ , joka taas aiheuttaisi kuristimeen noin  $13 \text{ mA}$  virran.

### 6.1.6 Asennusmallin vaikutus magneettikenttiin

Asennusmallien vaikutuksia magneettikentän voimakkuuteen voidaan päätellä voima-johtojen vastaavista asennusmalleista ja magneettikentistä.

Symmetrisen kolmivaiheisen järjestelmän voidaan periaatteessa ajatella olevan kaukaiseen pisteeseen nähden kentätön. Eri vaiheet kompensoivat toistensa vaikutukset. Käytännössä näin ei voida ajatella, koska kuristimien lähialueella eri vaiheet sijaitsevat etäällä toisistaan. /34/

Kuristimet voidaan periaatteessa asentaa, joko riviin tai kolmioon luvussa 7.3 mainittuun tapaan. Asennusmallin lisäksi kentän syntyyn vaikuttaa eri vaiheiden väliset etäisyydet: vaihevälejä pienentämällä myös magneettikentät ympäristössä pienenevät /34/. Kuristimien lähialueella kuristimien kolmioasennus aiheuttaa pienemmän kentän. Riviasennuksessa kenttä rivin päässä on pienempi kuin rivin sivuilla.

Magneettikenttien kannalta kolmioasennusmalli olisi edullisempi. Käytännössä se ei kuitenkaan tule kysymykseen muista asennukseen liittyvistä seikoista (tilantarve ja johdotukset) johtuen.

## 6.2 Äänitaso

Kuristimet tullaan sijoittamaan lähelle asuinalueita, joten on syytä tarkastella myös siitä mahdollisesti syntyvät äänihaitat.

Kuvitellaan kuristin pistemäiseksi äänilähteeksi, joka lähettää äänitehon  $P$  tasaisesti kaikkiin suuntiin. Etäisyydellä  $r_1$  teho on jakautunut  $r_1$ -säteisen pallon pinnalle, jonka pinta-ala  $A = 4\pi r_1^2$ . Intensiteetti  $I_1$  etäisyydellä  $r_1$  on siten /15, 16/

$$I_1 = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r_1^2}. \quad (6.3)$$



Vastaavasti intensiteetti etäisyydellä  $r_2$  on

$$I_2 = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r_2^2}. \quad (6.4)$$

Teho  $P$  pysyy vakiona, joten /16/

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2. \quad (6.5)$$

Tästä seuraa, että

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (6.6)$$

Intensiteetti on siis kääntäen verrannollinen etäisyyden  $r$  neliöön.

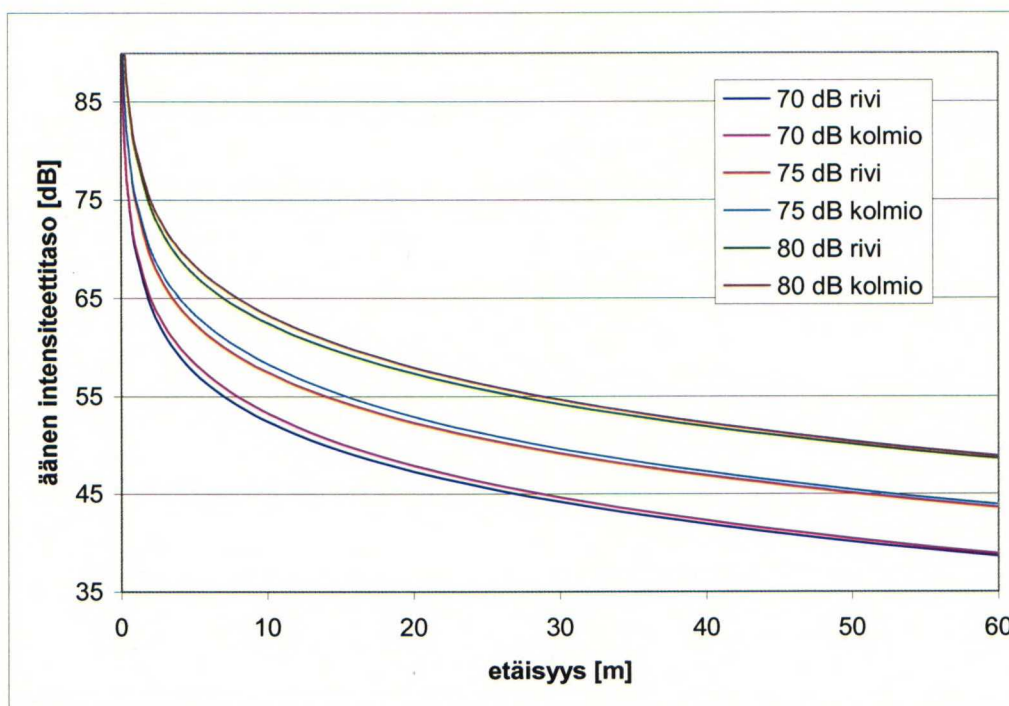
Intensiteeteille on laajan skaalansa takia havainnollisempaa käyttää logaritmista asteikkoa. Äänen intensiteettitaso  $\beta$  määritellään /15/

$$\beta = (10\text{dB}) \log \frac{I}{I_0}, \quad (6.7)$$

missä vertailuintensiteetiksi  $I_0 (= 10^{-12} \text{ W / m}^2)$  on valittu tyypillistä ihmisen kuulokynnystä vastaava arvo 1 kHz taajuudella. /16/

Yksi kuristin tuottaa yhden metrin etäisyydelle noin 75 dB:n äänenvoimakkuuden. Äänenvoimakkuus on ns. A-painotettu, eli se on painotettu ihmisen kuuloa vastaavalla taajuuskorjauksella. Kuristimia tulee kolme kappaletta ja asennusmallivaihtoehtoina on kuvan 7.4 kaltainen riviasennus tai kuvassa 7.5 esitetty kolmioasennusmalli. Jotta saadaan tietoon kuristimien yhteisvaikutus, tulee niiden aiheuttamat äänen intensiteetit summata kussakin pisteessä yhteen.

Kuvaan 6.3 on laskettu intensiteettitason arvot 60 m säteellä kuristimista rivi- ja kolmioasennusmalleissa, äänen intensiteettitasoilla metrin etäisyydellä 70, 75 ja 80 dB.



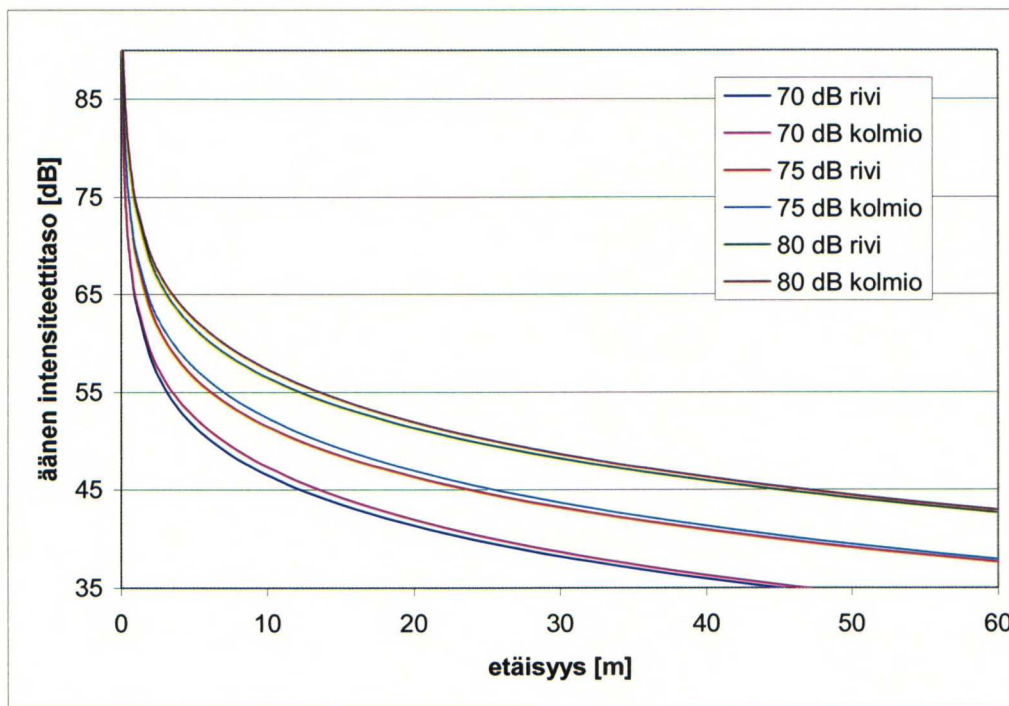
**Kuva 6.3.** Äänen intensiteettitasot etäisyyden funktiona rivi- ja kolmioasennuksissa. Äänenvoimakkuudet 70 dB, 75 dB ja 80 dB yhden metrin etäisyydellä kuristimesta.

Kuvasta 6.3 voidaan nähdä, että riviasennuksella päästään alempiin intensiteettitasoihin vastaavalla etäisyydellä kuin kolmioasennuksessa. Kolmioasennus olisi rakenteeltaan kuitenkin tiiviimpi, jolloin kuristimet saadaan sijoitettua noin neljä metriä kauemmaksi asutuksesta.

Ympäristöministeriön laatimassa melutason ohjearvoissa (taulukko 6.2) määritellään eri tiloissa eri päivänaikeihin ohjeistetut melutasot. Taulukosta 6.2 voidaan nähdä, että asumiseen käytettävissä alueissa ulkotiloille yöllä klo 22-7 sallittu äänenvoimakkuustaso on uusilla asuinalueilla 45 dB ja muilla 50 dB. Kyseessä olevalle asuinympäristölle ohjeraja on 50 dB, mutta alueelle on suunniteltu paljon uutta asutusta. Lisäksi aiheutetun äänen intensiteettitasoon on lisättävä 5 dB, jos ääni tulkitaan erityisen häiritseväksi, kuten erilaiset vinkunat. Kuristimista aiheutuva ääni on kapeakaistaista, joten se voidaan tulkita edellä mainituksi erityisen häiritseväksi ääneksi. Kuvasta 6.3 nähdään, että jos kuristimen intensiteettitaso on 75 dB yhden metrin päässä kuristimesta, riviasennuksessa 50 dB raja alitetaan hieman alle 30 metrin ja 45 dB noin 50 metrin etäisyydellä. Desibeli-asteikon luonteesta (logaritminen) johtuen on erittäin suuri vaikutus sillä, miten suuri intensiteettitaso on metrin päässä kuristimesta. Kolme desibeliä suurempi äänen intensi-

teettitaso tarkoittaa äänen intensiteetin kaksinkertaistumista. Asteikon luonteesta johtuen myös vaimeneminen muuttuu etäälle mentäessä hitaaksi. Tarkastelussa on syytä ottaa huomioon myös muista mahdollisista äänilähteistä syntyvät äänet. Maata pitkin johtuvaa ääntä ei tarvitse maanrakenteen vuoksi ottaa erikseen tarkasteluun, vaan voidaan olettaa sen vaimenevan kokonaisuudessaan.

Kuristimien etäisyys lähimpiin tontteihin tulee olemaan noin neljäkymmentä metriä (sijoituspaikkavalinnasta kerrottu tarkemmin luvussa 7.3). Kuvasta 6.3 voidaan päätellä, että kuristimien aiotussa sijoituspaikassa tulee vaikeuksia äänitasojen kanssa, jos kuristimen tuottama äänitaso on valmistajan ilmoittaman 75 dB:n suuruinen. Mahdolliseksi ratkaisuksi tuleekin kuristimien kotelointi. Valmistajan ilmoittamalla koteloinnilla äänitasoa saadaan laskettua kahden metrin etäisyydellä kuristimesta noin 6-8 dB. Kuvassa 6.4 on laskettu intensiteettitasot vastaaville tilanteille kuin kuvassa 6.3 siten, että kuristimet on nyt koteloitu. Koteloinnin vaikutukseksi on otettu 6 dB yhden metrin etäisyydellä.



**Kuva 6.4.** Äänen intensiteettitasot etäisyyden funktiona rivi- ja kolmioasennuksissa koteloituille kuristimille. Äänenvoimakkuudet 70 dB, 75 dB ja 80 dB yhden metrin etäisyydellä kuristimesta (ilman kotelointia).



Alle 45 dB:n päästään nyt noin 25 metrin etäisyydellä ja lähimpään pihaan aiheutuu noin 40 dB äänen intensiteettitaso (~ 40 metrin etäisyydellä) kuristimista rivi asennuksessa, kun metrin päässä äänitaso on 75 dB.

**Taulukko 6.2.** Melutason ohjearvot. /17/

	Melun A-painotettu keskiäänitaso (ekvivalenttitaso), LAeq, enintään	
	Päivällä klo 7-22	Yöllä klo 22-7
<b>ULKONA</b>		
Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB	45-50 dB <sup>1) 2)</sup>
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45 dB	40 dB <sup>3)</sup>
<b>SISÄLLÄ</b>		
Asuin-, potilas- ja majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetus- ja kokoontumistilat	35 dB	-
Liike- ja toimistohuoneet	45 dB	-

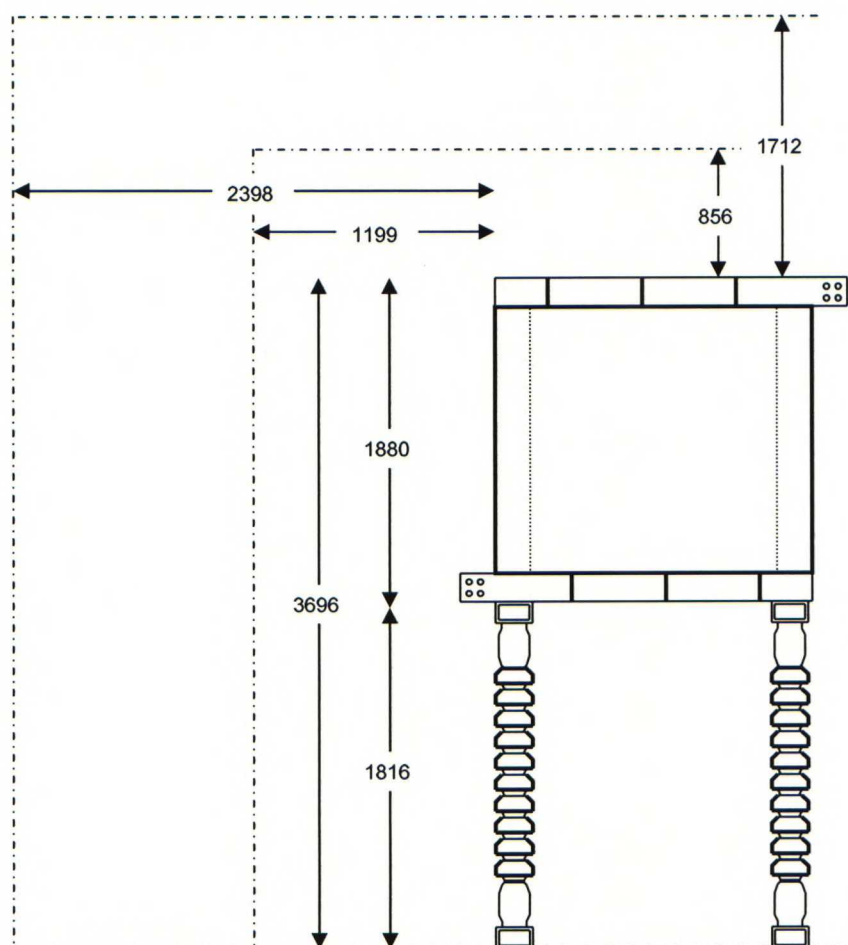
<sup>1)</sup> Uusilla alueilla melutason yöohjearvo on 45 dB.  
<sup>2)</sup> Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa.  
<sup>3)</sup> Yöohjearvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleisesti käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä.

Jotta saataisiin hieman enemmän käsitystä siitä miten voimakasta ääntä mainitut intensiteettitasot vastaavat, voidaan todeta, että normaali puhe on noin 50 dB ja hiljainen puhe 40 dB. Kuristimesta syntyvää äänitasoa voidaan havainnollistaa, kun verrataan sitä normaaliin katumeluun, joka on noin 70 dB. /35 Lisäksi on syytä huomata, että matala taajuus aiheuttaa helposti erilaisissa rakenteissa resonointia, joka saattaa ilmetä esimerkiksi ikkunautojen tms. tärinänä. Resonoinnissa syntyvät äänet voivat olla itse resonoinnin aiheuttavaa ääntä voimakkaampia.

## 7 Asennus

### 7.1 Tukirakenteet

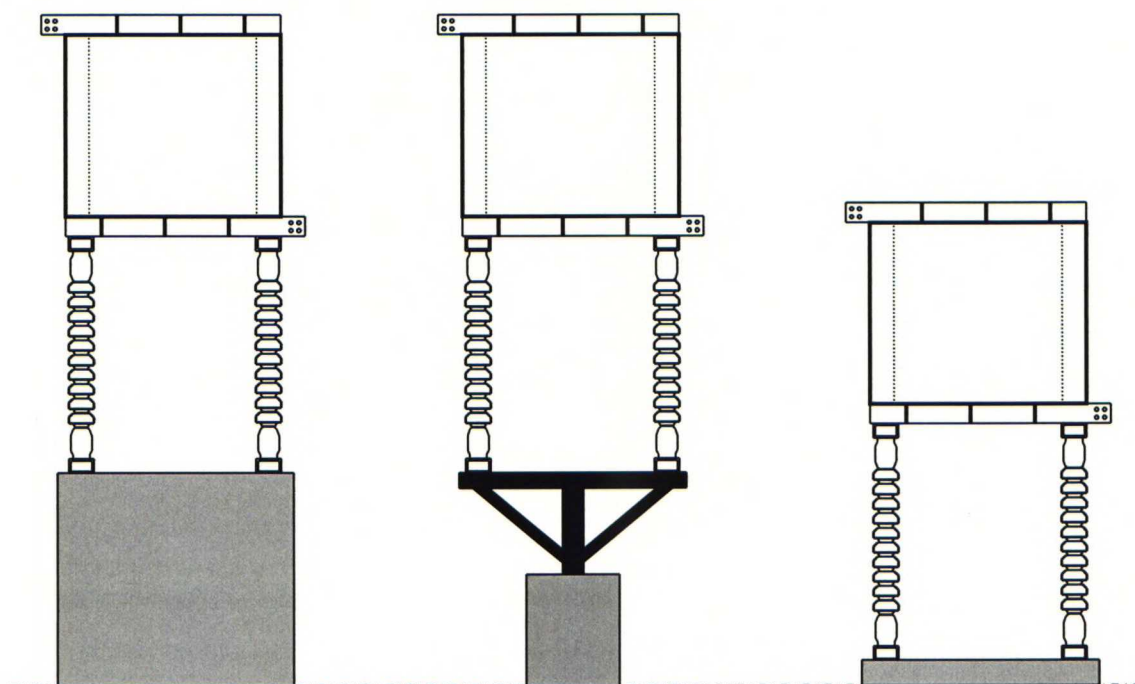
Kuristimia varten rakennetaan betonista ja teräksestä jalustat. Kuristimien alapuolella olevat eristimet pitävät huolen siitä, että metallirakenteet eivät tule liian lähelle kuristimesta aiheutuvia magneettikenttiä. Kuvassa 7.1 on esitetty magneettikentistä aiheutuvat asennusetäisyydet. Sisemmät rajat ovat alue, jossa ei saa olla lainkaan metalliosia. Ulommalla alueella saa esiintyä pieniä metalliosia ja alueen ulkopuolella silmukoita muodostavia metalliosia.



**Kuva 7.1.** Sivukuva kuristimesta ja asennusetäisyyksistä. Mitat perustuvat erään laite-toimittajan 5 Ω kuristimen tietoihin.

Jos kuristimien ympärille rakennetaan aita, ei jalustan tarvitse nostaa kuristinta juuri-kaan ylemmäs, vaan jalusta toimii ainoastaan asennusalustana. Vaihtoehtoisesti jalustas-ta voidaan tehdä niin korkea, että magneettikentistä ja jännite-etäisyyksistä johtuvat turvamääräykset tulee täytettyä. Jalustan tulee olla sellainen, että se kestää kuristimien ja eristimien aiheuttaman painorasisituksen (2369 kg). Vastaavasti eristimien (6 kpl/kuristin) tulee kestää kuristimen paino (1710 kg). Lisäksi kaapelipäätteiltä kuristinpäätteille tulevat jompit aiheuttavat pientä rasisitusta.

Kuvassa 7.2 on esitetty esimerkkejä mahdollisista kuristimen jalustamalleista. Vasem-manpuoleinen kuristin on asennettu betonivalun päälle, keskimmäinen terästelineelle, jonka jalka on upotettu betonivaluun, ja oikean puoleinen kuristin on asennettu matalal-le betonialustalle.



**Kuva 7.2.** Kuristimen jalustavaihtoehtoja.

Painorasisitusten lisäksi tukirakenteiden tulee kestää oikosulussa tai esimerkiksi työmaa-räjäytyksissä syntyvät dynaamiset voimat.

Talviaikaan on mahdollista, että lumi ja jää voivat aiheuttaa ongelmia kuristimien jääh-dytysilmankierrolle. Ollessa normaalisti toiminnassa, kuristimista syntyvä häviölämpö pitää ne sulina, mutta kuristimien ollessa jostain syystä poissa käytöstä voi lunta ja jäätä

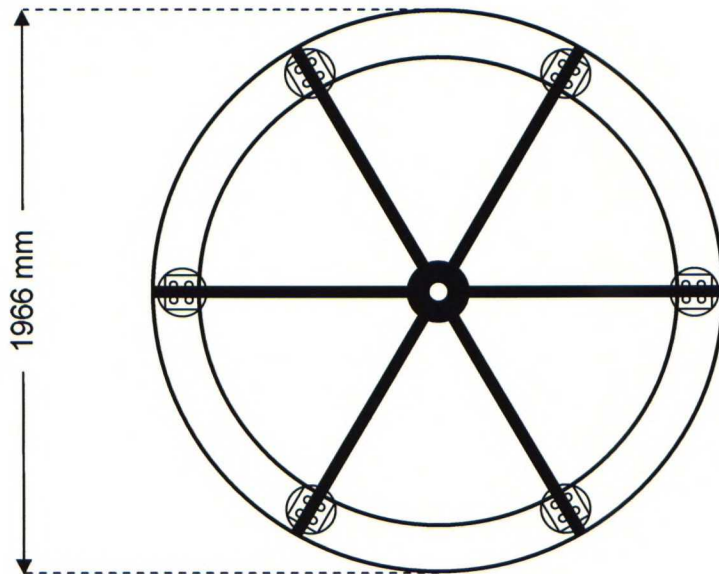


päästä kertymään rakenteisiin. Jäähdytysongelmat voivat aiheuttaa ylikuumenemista, jonka seurauksena voi syntyä halkeamia kuristimen pintaan, joista taas vesi pääsisi valumaan sisään. Luvussa 6.2 äänitasoista puhuttaessa kerrottiin mahdollisesta äänieristyskoteloinnista. Kotelointi suojaisi kuristimia myös edellä mainitun kaltaisilta jäätymisongelmilta.

## 7.2 Maadoitukset

Turvallisuusvaatimukset edellyttävät, että sähkölaitteiden kosketeltavissa olevat metalliosat ovat maadoitettuja./19/ Kuristimen magneettikentät voivat aiheuttaa ympäröiviin metallisosiin jännitteitä, minkä seurauksena kuristimien jalustoissa käytetyt metallirakenteet ja kuristimien ympärille mahdollisesti asennettava aita tulee maadoittaa. Asennuspaikalla on jo ennestään, kytkinkentästä johtuen, hyvä maadoitus, johon kuristimien maadoitukset voidaan liittää.

## 7.3 Asennuksen esisuunnittelu

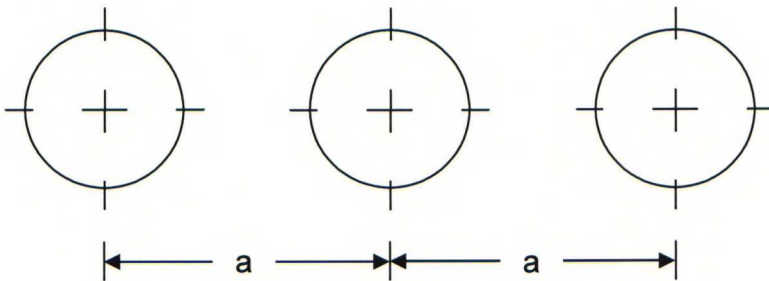


**Kuva 7.3.** Kuristimen halkaisija.

Asennuksessa tulee kuristimien väliin jättää 2352 mm välit. Kuristimen läheisyydessä ei saa esiintyä metallia. Pienien metalliosien etäisyys kuristimista tulee säteittäisesti olla

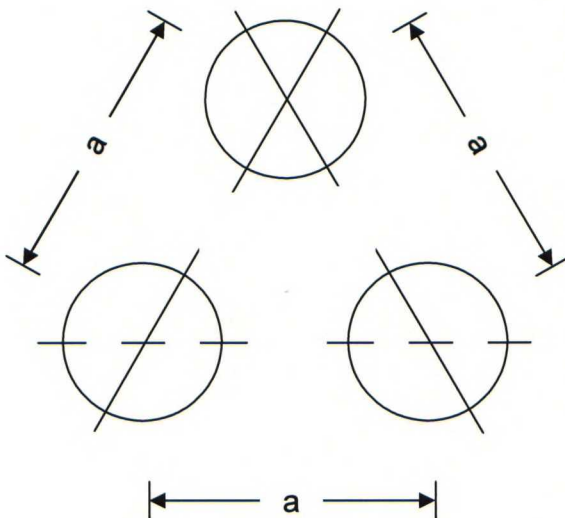
vähintään 1199 mm ja suljettujen metallisilmukoiden, kuten maadoitusjohtojen, 2398 mm. Ylä- ja alapuolelle vastaavat rajat ovat 856 / 1712 mm (kuva 7.1).

Asennettaessa kuristimet kuvan 7.4 mukaisesti riviin, tulee niille varata 13,3 m x 4,4 m alue ( $= 59 \text{ m}^2$ ), joka ei sisällä metallia. Alueen 15,4 m x 6,8 m ( $= 105 \text{ m}^2$ ) ulkopuolella saa alkaa esiintymään silmukoituja metalliosia.



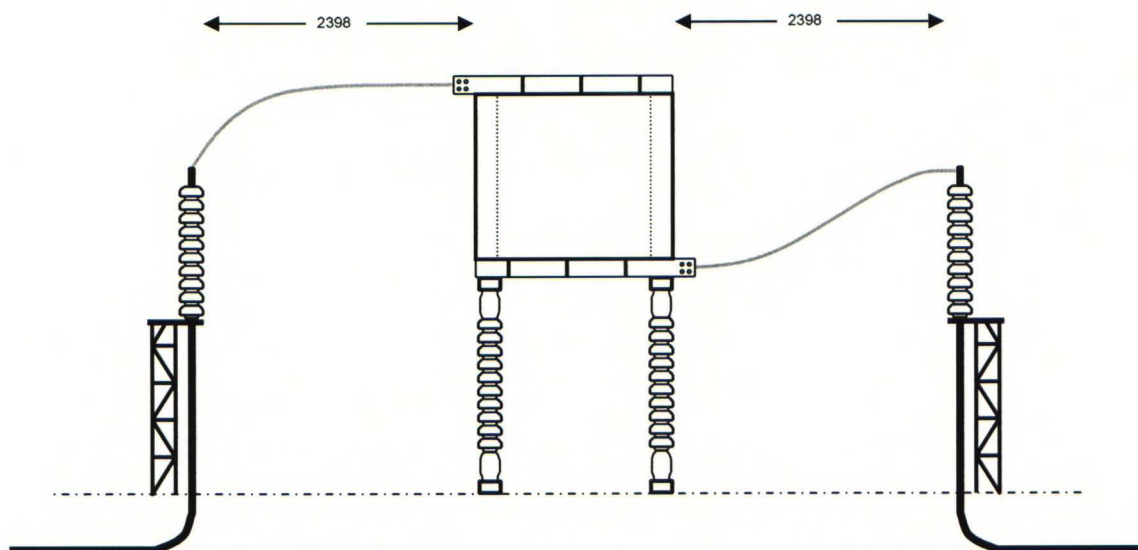
**Kuva 7.4.** Kuristimien riviasennusmalli ( $a = 4318 \text{ mm}$ ).

Asennettaessa kuristimet kuvan 7.5 mukaisesti kolmioon, tulee niille varata 8,7 m x 8,1 m alue ( $= 70 \text{ m}^2$ ), joka ei sisällä metallia. Alueen 11,1 m x 10,6 m ( $= 118 \text{ m}^2$ ) ulkopuolella saa alkaa esiintymään silmukoituja metalliosia.



**Kuva 7.5.** Kuristimien kolmioasennusmalli ( $a = 4318 \text{ mm}$ ).

Kuvassa 7.6 on esitetty yhden vaiheen kuristimen verkkoon liittämistapa. Aluksi kaapeli tuodaan kaapelipäätteelle, josta se jatketaan alumiinijohdinta pitkin kuristimen liittimeen. Vastaavanlainen rakenne tehdään kuristimen molempiin puoliin.



**Kuva 7.6.** Kuristimen verkkoon liittäminen.

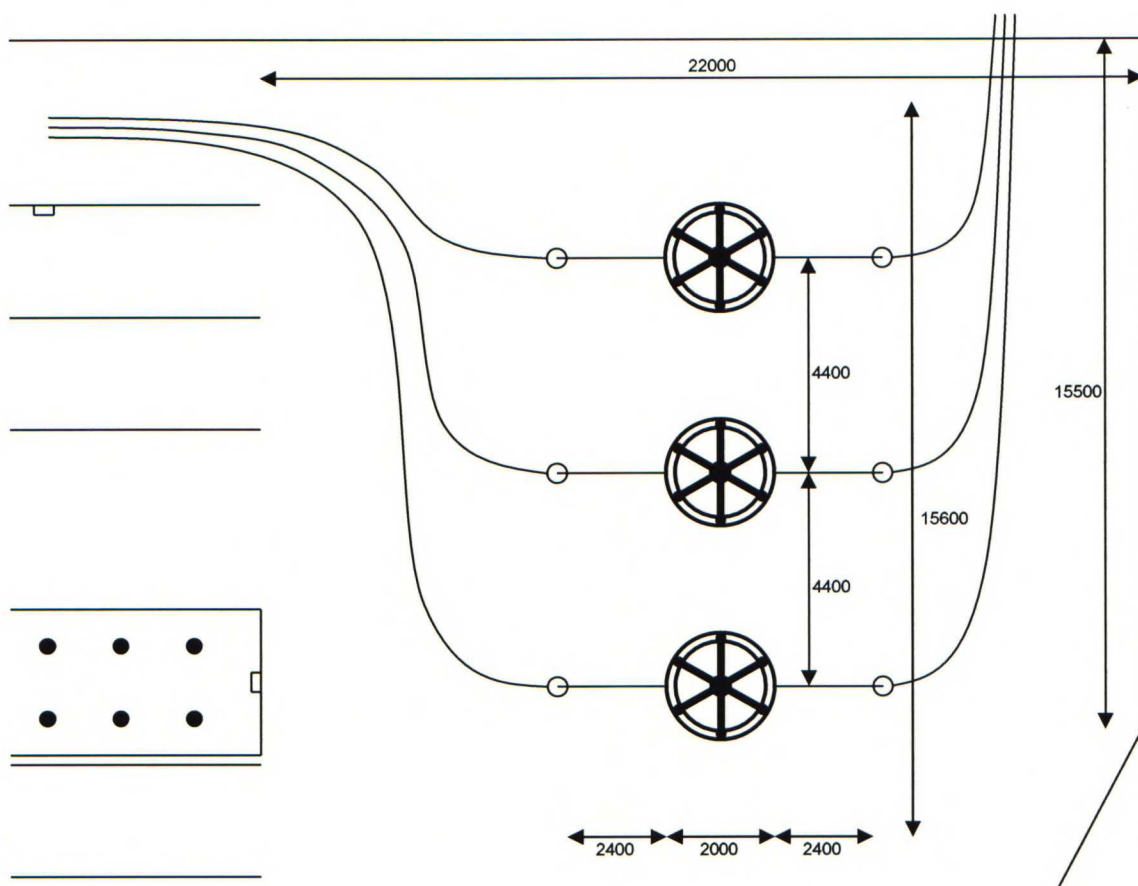
Viikinmäen 110 kV:n kytkinkentällä on tällä hetkellä kaksi vapaata kennopaikkaa, joten laajennusvaraa ei tarvitse enää jättää.

Kaapeli, jolle kuristimet kytketään, on öljypaperieristeinen OHPLKM400 kaapeli. Vanhaa öljypaperieristeistä kaapelia ei mielellään öljyvuodon vaaran vuoksi lähdetä taivuttamaan, joten tarvittavat kaapeloinnit tuleekin tehdä uudella PEX - eristeisellä AHXLMK800 kaapelilla. Vanha kaapeli jatketaan öljykaapeli - PEX kaapelijatkoksella.

Tämän hetkiset kaapelin öljysäiliöt sijaitsevat Pasilan kennon yhteydessä. Säiliöstä täytyy rakentaa putket vanhalle öljykaapelille tai vaihtoehtoisesti siirtää öljysäiliöt kaapelille. Jälkimmäinen vaihtoehto tarkoittaisi käytännössä sitä, että säiliöille tulisi rakentaa koppi, joten tilan- ja rahankäytön kannalta putkien rakentamisvaihtoehto on edullisempi.

Kaapelien risteilyä päällekkäin pyritään välttämään. Muutoinkin mahdollisimman yksinkertainen ratkaisumalli kuristimien sijoituksen suhteen on suositeltavaa. Ainoaksi mahdolliseksi asennustavaksi tuleekin rivasennus siten, että kuristimet ovat kytkinkentän suuntaa vasten poikittain kuvan 7.7 tapaan. Kuvaan 7.7 on hahmoteltu myös kaapelipäätteiden sijainnit asennuksessa ja yksi mahdollinen kaapelireittivalinta.





**Kuva 7.7.** Kuristimien sijoitus kytkinkentälle.

Kuvan 7.7 asennusmallin mukaisessa sijoittelussa kaapelit eivät joudu kulkemaan toisensa yli ja komponenttien sijoittelu on muutenkin symmetrinen kytkinkenttään nähden. Lisäksi kuristimien taakse voidaan tarvittaessa jättää kulkureitin mahdollistava tila esimerkiksi huoltoajoa varten.

Kuristimet tulee asentaa magneettikentistä johtuen yli 3 m:n etäisyydelle kytkinkentän aidasta. Lisäksi tulee huomioida kaapelipäätteiden yms. aiheuttamat jännite-etäisyydet. Yleisön käytössä olevat alueet tulee olla vähintään 6 m:n etäisyydellä kuristimista (tarkempia tietoja magneettikentistä luvussa 6.1.3). Erillistä aitaa kuristimille ei tarvita, jos kuristimet asennetaan jalustan avulla riittävän korkealle. Jalustojen tulee olla vähintään 3 m korkeita, kun eristimien pituus on 1,8 m.

Mahdollista toista rinnakkaista kaapelia varten tarvitaan myös toiset kuristimet. Näiden sijoitustapa on vastaavanlainen kuin edellä esitetty. Sijainniksi niille tulisi kytkinkentän toinen pääty.

## 8 Kustannukset

Kuristinasennuksessa kuristimien osuus kustannuksista on noin neljännes, muita kustannustekijöitä ovat:

- suunnittelu
- kuljetukset
- perustukset
- kuristimien asennus
- muut laitehankinnat ja laitteiden asennukset:
  - kaapelipäätteet + telineet
  - kaapelit
  - kaapelijatkokset
  - ylijännitesuojat + telineet
- liittymisjärjestelyt
- käyttöönotto.

Suurjännitelaitteissa asennuksen osuus kustannuksista on suuri. Taulukkoon 8.1 on tehty arvioita syntyvistä kustannuksista asennuksineen.

**Taulukko 8.1.** Kustannusarvio.

	hinta [€/kpl,m]	yksiköt [kpl,m]	yhteensä [€]
kuristimet	30000	3	90000
kotelointi	36000	3	108000
suunnittelu	35000	1	35000
kuljetukset	2000	3	6000
perustukset	18000	1	18000
kuristimien asennus	5000	1	5000
kaapelipäätteet	2000	6	12000
kaapelit	1000	70	70000
kaapelijatkokset	30000	3	90000
ylijännitesuojat	5000	6	30000
liittymisjärjestelyt	5000	1	5000
käyttöönotto	5000	1	5000
yhteensä			474000

Kustannusarviotaulukossa 8.1 on huomioitu myös kuristimien koteloinnista syntyvät laitehankintakustannukset. Voidaan todeta, että kotelointi on melko kallis toimenpide, kun lisätään hintaan vielä siitä syntyvät kuljetus- ja asennuskustannukset. Jättämällä kotelot pois hinnaksi muodostuu 366000 €. Ylijännitesuojia on laskelmissa kuusi kappa-

letta. Se tarkoittaisi sitä, että kaikille kaapelipäätteille tulisi oma suoja. Kuten luvussa 5.1 kerrottiin, kuristimia varten ei tarvita erillisiä ylijännitesuojia, jos suojaustasoa Viikinmäen puolella parannetaan riittävälle tasolle.

Luvussa 5.5 laskettiin kuristimissa syntyviä tehohäviöitä. Pätötehohäviöistä aiheutuvat häviöenergia kustannukset lasketaan häviösähkön hinnan avulla. Kuvassa 3.16 on esitetty kaapelin Pasila - Vallila virtatiedot vuonna 2003. Virtatietojen avulla voidaan laskea pätöhäviökustannukset

$$k_p = m \int_0^a 3R \cdot (nI(t))^2 dt \quad (8.1)$$

missä	$k_p$	= pätötehohäviökustannukset
	$R$	= kuristimen resistanssi (= 51,3 mΩ)
	$I(t)$	= kuormitusvirta ajan $t$ funktiona
	$a$	= vuosi
	$n$	= kuristimen aiheuttama virran alenemakerroin
	$m$	= häviösähkön hinta.

Otetaan häviösähkön hinnaksi 32 €/MWh ja kuristimen aiheuttamaksi virran alenemakertoimeksi 0,5. Tällöin kuristimien pätötehohäviöistä aiheutuvat kustannukset ovat noin 1200 €/a. Jos tarkastellaan koko verkkoa, kuristimet voivat kuitenkin jopa pienentää pätöhäviöitä. Tämä johtuu rinnakkaisten avojohtoyhteyksien kaapeliyhteyttä pienemmistä resistanssiarvoista.

Kuristimet kuluttavat maksimikuormitusvirralla (= 600 A) loistehoa noin 5,4 MVar:a (kuva 5.5). Normaaliolosuhteissa loistehontarve on alle neljäsosa maksimista siitä huolimatta, että otetaan huomioon kiertävistä virroista aiheutuvat häviöt. Lähelle maksimiarvoa joudutaan vain erikoistilanteissa, kuten esimerkiksi Suvilahden ja Vallilan välisen kaksoiskaapeliyhteyden ollessa poissa käytöstä. Jos loistehoa varten joudutaan rakentamaan lisää kompensointikondensaattoreita, tulee siitä kustannuksia noin 200000 € (~ 5 MVar). Toinen vaihtoehto on ostaa loisteho voimalaitoksilta, jolloin hinnaksi arvioidaan tulevan noin 5000 €/a. Jälkimmäinen vaihtoehto on edullisempi, jos tuotantokoneistossa on vapaata kapasiteettiä tuottaa loistehoa tarvittava määrä.



## 9 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä diplomityössä on selvitetty virranrajoituskuristimien käyttöä Helsingin Energian 110 kV:n siirtoverkossa kaapelilla Viikinmäki - Pasila. Luvussa 4 tutkitaan kuristimen mitoituseseen liittyviä kysymyksiä. Näkökohdiksi on otettu verkon kuormitus, vikavirrat, erilaiset ylijännitteet, resonanssit ja stabiilisuus. Luvussa 5 ja 6 tarkastellaan muita syntyviä vaikutuksia, joita ovat jännitteenalenema, häviöt, magneettikentät ja melu. Lisäksi työssä tarkastellaan ylijännitesuojausta ja kuristimen käyttöperiaatteita.

Tuloksista voidaan todeta, että viiden ohmin kuristimien lisäämisellä saadaan tehonjako verkossa muuttumaan paremmaksi: kaapeliyhteys Suvilahdesta Viikinmäkeen voidaan pitää toiminnassa kuormitettavuuden puolesta kaikissa N-1 periaatteen (luku 2.3) mukaisissa tilanteissa. Toinen mahdollinen vaihtoehto olisi seitsemän ohmin kuristin, jolla pystyttäisiin toimimaan varmemmin vaikeissa kytkentätilanteissa, mutta normaaleissa olosuhteissa aiheutetaan turhia häviöitä virtojen kiertämisen seurauksena.

Kuristimien vaikutusta verkkoon on tarkasteltu erittäin hankalissa verkon toimintatilanteissa. Laskennoissa on käytetty jonkun verran oletuksia erinäisistä arvoista, mikä tulee huomioida epätarkkuustekijänä tuloksia lukiessa. Aiheutuvat verkostovaikutukset ovat siitä huolimatta hyväksyttävien rajojen sisäpuolella. Hankalimpia toimintatilanteita katsotaan olevan kaapelin Viikinmäki - Pasila säteittäissyöttötilanteet. Vaikutuksia vähentämään on mahdollista rakentaa myös kuristimien ohituskytkentä. Ohituskytkentä, esimerkiksi kuristimien huollon ajaksi, voidaan toteuttaa luvussa 5.2 esitetyllä jomppikytkennällä. Verkon ollessa normaalissa toimintatilassa, jossa kaikki johdot ovat kiinni, ovat verkostovaikutukset suhteellisen pieniä, lukuun ottamatta tehonjaon muuttumista.

Ylijännitesuojaus kaapelille Viikinmäestä Pasilaan on Viikinmäen puoleisesta päästä toteutettu 126 kV venttiilisuojuilla. Suojien suojaustaso ukkosylijännitteitä vastaan on 315 kV. Kuten luvussa 5.1 kerrotaan, on suojaustaso liian huono kuristimille, jotka on mitoitettu kestäämään 550 kV:n syöksyjännite. Kaapelille on suunniteltu vaihdettavaksi ylijännitesuojat, joiden suojaustaso salamasyöksyjännitteille on 289 kV. Lopullista asennussuunnitelmaa tehdessä on syytä selvittää aiheutuuko erillistä ylijännitesuojatarvetta, kun tunnetaan tarkemmin kuristimen Viikinmäen kennoon yhdistävän kaapelin pituus ja lisäksi otetaan huomioon kuristimen kapasitanssin vaimentava vaikutus.

Kuristimien asennuspaikka tulee lähelle asutusta ja kulkureittejä. Tämän takia ympäristövaikutusten huomioiminen on ensisijaisen tärkeää. Ympäristövaikutuksista merkittävimmit nousevat magneettikentät ja melu. Kuristimet ovat laitteita, jotka aiheuttavat suuria magneettikenttiä ja asennuspaikan olosuhteissa niitä on vaikea torjua. Magneettikentät voivat aiheuttaa laitehäiriöitä, joten kuristimet tulee sijoittaa mahdollisimman kauas viereisistä pihoista. Valmistaja on ilmoittanut yhden kuristimen melulle arvoksi 75 dBA. Arvo tuntuu melko suurelta, jos sitä verrataan vastaavan tyyppisesti toteutettuihin kuristinasennuksiin, joissa minkäänlaista melua ei ole edes tiedostettu. Oletettavasti normaalitoiminnassa äänitasot ovatkin alhaisempia, mutta asian tärkeydestä johtuen tulee äänitasokysymyksistä tehdä lisäselvityspyyntö eri laitevalmistajille. Kuristimille on olemassa äänikoteloita, joilla äänen intensiteettitasoa saadaan laskemaan noin 6-8 dB. Maisemallista haittaa kuristimista ei aiheudu, koska asennuspaikka on vanhan 110 kV kytkinkentän yhteydessä, johon naapuriasukkaiden voidaan katsoa jo tottuneen.

Kuristimet kuluttavat suurilla virroilla merkittävästi loistehoa (~5 MVar). Tarvittava loisteho tuotetaan joko voimalaitoksilla tai erillisillä kompensointikondensaattoreilla. Jos voimalaitoksilta saatava loistehokapasiteetti ei riitä, aiheutuu kompensoinnista huomattavan suuria lisäkustannuksia.

Verrattaessa kuristinasennusta muihin mahdollisiin ratkaisuvaihtoehtoihin, on se taloudellisesti tarkastellen edullinen. Kustannuksia kuitenkin lisää merkittävästi, jos kuristimet siirretään kytkinkentän muuton yhteydessä sisätiloihin. Harkittavaksi jääkin, kannattaisiko kuristimet kerralla sijoittaa niiden lopulliseen asennuspaikkaan tai vaihtoehtoisesti jättää ne kytkinkentälle kytkinkentän muutosta huolimatta.



---

## ***Lähdeluettelo***

- /1/ Helsingin Energia / HelenVerkko / Yleissuunnittelu / Antti Rautiainen, Muistio Virranrajoituskuristin, 7.4.2004.
- /2/ Elovaara Jarmo, Laiho Yrjö, Sähkölaitostekniikan perusteet, moniste 499, Ota-tieto, Neljäs korjattu painos, 1999, Valopaino Oy, Helsinki, ISBN 951-672-285-7, 487 s.
- /3/ Hirvonen Ritva, Opetusmoniste: Sähkönsiirtojärjestelmät, 2002, 314 s.
- /4/ Partanen Jarmo, Opetusmoniste: Sähköverkkotekniikka, 2004.
- /5/ Vanhala Hanna-Leena, Tehoelektroniikkaa hyödyntävät sovellukset sähkönsiirtojärjestelmän hallinnassa, seminaarityö, 2000, Lappeenranta, 14 s.
- /6/ Hokkanen Jari, Voimansiirtoverkkojen sarjakompensointi, seminaarityö, 1998, Lappeenranta, 26 s.
- /7/ Miller Timothy J. E., Reactive Power Control in Electric Systems, 1982, John Wiley & Sons, Inc., Kanada, ISBN 0-471-86933-3, 381 s.
- /8/ Hingorani, Gyugyi, Understanding FACTS, 2000, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, ISBN 0-7803-3455-8, 432 s.
- /9/ FACTS – powerful systems for flexible power transmission, ABB Review 5/1999.
- /10/ Geidl Martin, Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform, Diplomityö, Graz University of Technology, 2003, Sveitsi, 68 s.
- /11/ HelenVerkon esittely, Microsoft Powerpoint esitys, 2003.
- /12/ Repo Sami, On-line Voltage Stability Assesment of Power System – An Approach of Black-box Modelling, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisuja 344, Tampere, 2001, 158 s.



- 
- /13/ Nykänen Pekka, Helsingin sähkönsiirtoverkon kehittäminen, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki, 1990, 87 s.
- /14/ Reactors, Trench, Trench:n esite kuristimista.
- /15/ Young, Freedman, University Physics, ninth edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1996, 1484 s.
- /16/ Ääni ja kuuleminen, Opetusmoniste, Oulun yliopiston fysikaalisten tieteiden laitos, 2004.
- /17/ Ympäristöministeriö, Melutason ohjeavot / yleiset melutason ohjeavot, Internet sivu: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=8899&lan=fi>, Valtion ympäristöhallinto.
- /18/ Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, Palva, Suurjännitetekniikka, moniste 568, Otatieto, Toinen korjattu ja täydennetty painos, 2003, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, ISBN 951-672-320-9, 520 s.
- /19/ Teknisiä tietoja ja taulukoita, Suomalaiset ABB-yhtiöt, 2000, Ykkös-Offset, kymmenes painos, Vaasa, ISBN 951-99366-0-2, 626 s.
- /20/ Greenwood Allan, Electrical Transients in Power Systems, Second edition, 1991, John Wiley & Sons, Kanada, ISBN 0-471-62058-0, 751 s.
- /21/ Air Core Reactors, Nokian Capacitors, Nokian Capacitorsin esite kuristimista, 2004.
- /22/ Helenin 110 kV suojaus, Microsoft Powerpoint esitys, 2003.
- /23/ Repo Sami, Sähkönsiirtoverkon jännitestabiilisuusmarginaalin approksimointi, Raportti / Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Sähköverkkotekniikka; 2, Tampere, 2000, ISBN 952-15-0435-8, 64 s.
- /24/ Pylvänäinen Jouni, Jakelumuuntajan seurantamenetelmien kehittäminen, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tesla-raportti nro 68/2002, Tampere 2002, 123 s.

- 
- /25/ Helsingin Energian voimalaitokset, Helsingin Energian Internet sivut sen voimalaitoksista <http://www.helsinginenergia.fi/tuotanto/voimalaitokset.html>.
- /26/ Rautiainen Antti, Kuormitusseurannan kehittäminen Helsingin Energian 110 kV sähköverkossa, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki, 2002, 62 s.
- /27/ Vuosikertomus 2003, Helsingin Energia, ArtPrint Oy, 2004, Helsinki, 34 s.
- /28/ Energiankulutustietoja, [www.energia.fi](http://www.energia.fi).
- /29/ Repo Sami, Sähkönsiirtoverkon jännitestabiilisuuden arviointi ja parantaminen, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1995, Tampere, 80 s.
- /30/ University of Missouri - Rolla, Electrical & Computer Engineering, Internet sivu [http://www.ece.umsr.edu/links/power/Energy\\_Course/energy/facts/facts.htm](http://www.ece.umsr.edu/links/power/Energy_Course/energy/facts/facts.htm).
- /31/ Kalenius Pentti, Sähköä helsinkiläisille, 75 vuotta sähköverkon rakentamista Helsingissä 1909-1984, 1993, Painatuskeskus Oy, 221 s.
- /32/ Helsingin Energia, Sähkö- ja magneettikentät: Kenttien ympäristövaikutukset, Internet sivu: <http://www.helsinginenergia.fi/ymparisto/sahkokentat.html>, Helsingin Energia.
- /33/ WHO, Electromagnetic fields (EMF), Internet sivu: <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index4.html>, WHO.
- /34/ Korpinen, Hietanen, Jokela, Juutilainen, Valjus, Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä, Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89/1995, Painatuskeskus Oy, 1995, 210 s.
- /35/ Maol taulukot, 6. uudistettu painos, Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto MAOL ry, Kustannusosakeyhtiö Otava, 1991, 157 s.
- /36/ Fingrid, Raportti 6.6.2001, Fingrid Oyj:n 110 kV verkon jännitteen ominaisuudet liittymispisteissä, 4 s.

## ***Haastattelut ja keskustelut***

<i>Nimi</i>	<i>Tehtävänimike</i>	<i>Yritys</i>
Aalto Anne-Maija	Rakennuttajainsinööri	HelenEngineering
Aro Martti	Professori	TKK
Böstman Ralf	Verkostoasiantuntija	HelenVerkko
Ekström Risto	Vastaava käyttömestari	HelenVerkko
Elhaffar Abdelsalam	Tutkija	TKK
Hakulinen Jari	Ryhmäpäällikkö	HelenEngineering
Havukainen Jyrki	Sähkölaitospäällikkö	Fortum
Helanen Markku	Suunnittelija	Nokian Capacitors
Hinkkanen Mika	Kunnossapitopäällikkö	HelenVerkko
Huuska Risto	Myyntipäällikkö	Nokian Capacitors
Hyvärinen Markku	Tutkimus- ja kehityspäällikkö	HelenVerkko
Joutsen Juha	Suunnitteluinsinööri	HelenEngineering
Juusti Jaakko	Esisuunnitteluinsinööri	HelenVerkko
Kyyrä Jorma	Professori	TKK
Lehtinen Jouni	Siirtohintapäällikkö	HelenVerkko
Lehtonen Markus	Yksikön päällikkö	HelenVerkko
Lehtonen Matti	Professori	TKK
Leinonen Aki	Tuotepäällikkö	Nokian Capacitors
Lhors Damien	Myyntipäällikkö	Trench
Loukkalahti Mika	Järjestelmäpäällikkö	HelenVerkko
Mutru Mika	Tuotesuunnittelija	Reka Kaapeli
Niemenmaa Asko	Professori	TKK
Orpana Jukka	Järjestelmäinsinööri	HelenVerkko



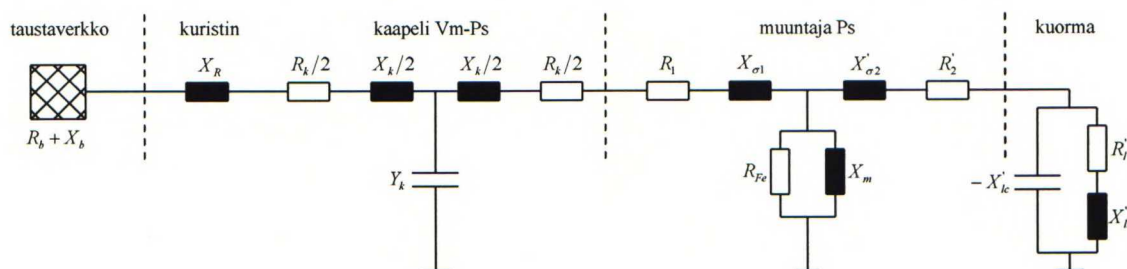
---

Pasanen Harri	Ympäristötarkastaja	Helsingin kaupungin ympäristökeskus
Rautiainen Antti	Tutkimusinsinööri	HelenVerkko
Riekk Jyrki	Esisuunnitteluinsinööri	HelenVerkko
Salonen Jarmo	Vanhempi suojausinsinööri	Fortum
Seitsonen Jorma	Laatuteknikko	HelenVerkko
Tom Frank	Myyntipäällikkö	Trench
Torikka Martti	Laatupäällikkö	Pirelli Cables and Systems
Tuovinen Kaj	Sähkömestari	Fortum
Vanhala Pauli	Suunnittelupäällikkö	HelenVerkko
Välimäki Vesa	Professori	TKK

## Liite 1

(1/2)

*Verkon sijaiskytkennän parametrien laskenta resonanssien laskentaa varten*



### Taustaverkko:

Taustaverkon parametrit lasketaan Viikinmäen oikosulkuvirran avulla.

$$I_{kVm} = 3 - 30 \text{ kA}$$

$$\varphi = 80^\circ$$

$$Z_b = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{kVm}}$$

t.v. 1:

$$I_{kVm} = 30 \text{ kA}$$

$$\Rightarrow Z_b = 2,2 \Omega, R_b = 0,38 \Omega, X_b = 2,17 \Omega$$

t.v. 2:

$$I_{kVm} = 3 \text{ kA}$$

$$\Rightarrow Z_b = 22 \Omega, R_b = 3,8 \Omega, X_b = 21,9 \Omega.$$

### Kuristin:

Kuristimen reaktanssin arvo on valittu

$$X_R = 5 \Omega \text{ tai } 7 \Omega.$$

### Kaapeli:

Kaapelien arvot perustuvat kaapelivalmistajan ilmoittamiin arvoihin johtokilometriä kohti, joista kaapelipituudella kerrottaessa on saatu

**Liite 1**

(2/2)

$$Y_k = 486 \mu S$$

$$\Rightarrow X_{kc} = 2057,6 \Omega$$

$$R_k = 0,296 \Omega$$

$$X_k = 0,511 \Omega.$$

**Muuntaja:**

$$R_{Fe} = \frac{U_N^2}{P_0} = \frac{(115kV)^2}{24,02kW} = 0,55M\Omega$$

$$X_m = \frac{U_N^2}{Q_0} = \frac{(115kV)^2}{11,9kVar} = 1,11M\Omega$$

$$R_s = u_{r12} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 0,0038 \cdot \frac{(115kV)^2}{40MVA} = 1,25 \Omega$$

$$X_s = u_{x12} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 0,1198 \cdot \frac{(115kV)^2}{40MVA} = 39,61 \Omega$$

$$\Rightarrow R_1 = R_2' = R_s / 2 = 0,63 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = X_s / 2 = 19,81 \Omega$$

**Kuorma:**

Oletetaan, että pienellä kuormalla (= max.8 MVA) kuormituksen tehokerroin olisi johdon kapasitansseista johtuen  $\cos \varphi = 0,9_{kap}$ .

$$Z_l' = \frac{U_N^2}{S_l} = \frac{(115)^2}{8MVA} = 1653,13 \Omega$$

$$R_{ls}' = Z_l' \cos \varphi = 1487,81 \Omega$$

$$X_{ls}' = Z_l' \sin \varphi = 720,58 \Omega$$

Kuvataan kyseinen kuormitus nyt resistanssin ja kapasitanssin rinnankytkentänä, jolloin parametreiksi saadaan

$$\frac{-jX_{lc}' \cdot R_l'}{-jX_{lc}' + R_l'} = 1487,81 \Omega - j720,58 \Omega$$

$$\Rightarrow R_l' = 1836,72 \Omega; \quad X_{lc}' = 3792,83 \Omega.$$

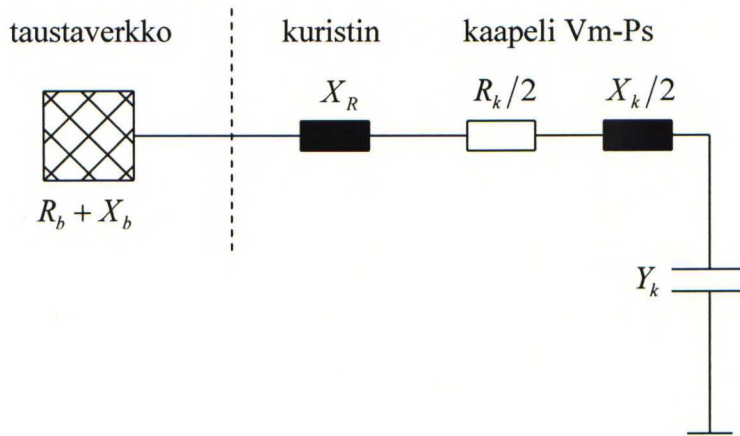


## Liite 2

(1/2)

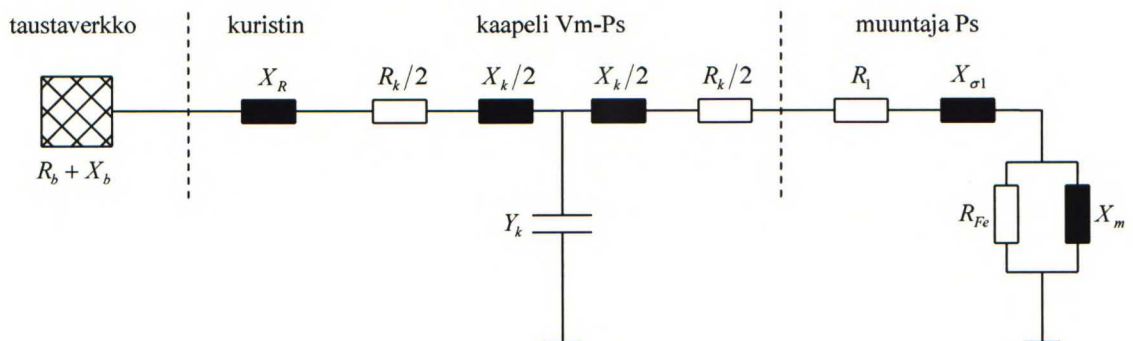
Verkon eri kytkentätilanteiden impedanssien laskenta resonansseja varten

## Tyhjäkäyvä johto:



$$Z = R_b + \frac{1}{2}R_k + (X_b + X_R + \frac{1}{2}X_k - X_{kc})j$$

## Tyhjäkäyvä muuntaja:



Otetaan käyttöön apumuuttujat  $a$  ja  $b$

$$a = \frac{1}{2}R_k + R_l + \frac{R_{Fe} \cdot X_m^2}{R_{Fe}^2 + X_m^2}$$

$$b = \frac{R_{Fe}^2 \cdot X_m}{R_{Fe}^2 + X_m^2} + \frac{1}{2}X_k + X_{\sigma 1}$$

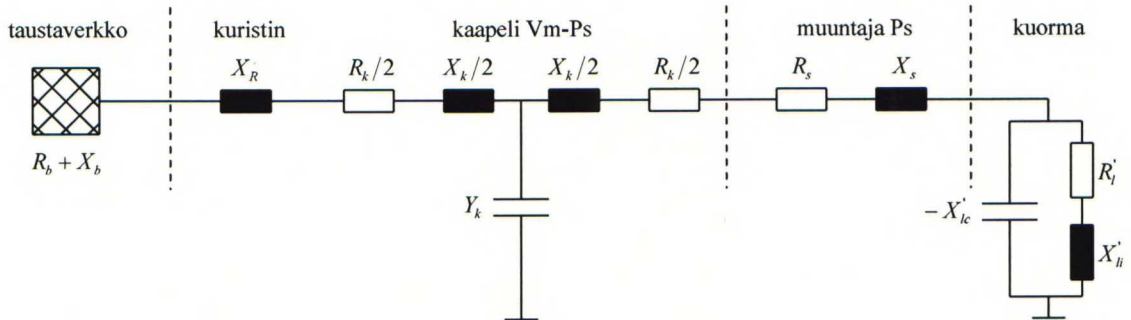
Kokonaisimpedanssiksi saadaan

## Liite 2

(2/2)

$$Z = R_b + \frac{1}{2} R_k + \frac{aX_{kc}^2}{X_{kc}^2 - 2b \cdot X_{kc} + a^2 + b^2} + \left( X_b + X_R + \frac{1}{2} X_k + \frac{(b \cdot X_{kc} - a^2 - b^2) \cdot X_{kc}}{X_{kc}^2 - 2b \cdot X_{kc} + a^2 + b^2} \right) j$$

## Kuormitettu muuntaja:



Otetaan käyttöön apumuuttujat  $c$  ja  $d$

$$c = \frac{1}{2} R_k + R_s + \frac{R_l' \cdot X_l'^2}{R_l'^2 + X_l'^2}$$

$$d = \frac{1}{2} X_k + X_s - \frac{R_l'^2 \cdot X_l'}{R_l'^2 + X_l'^2}$$

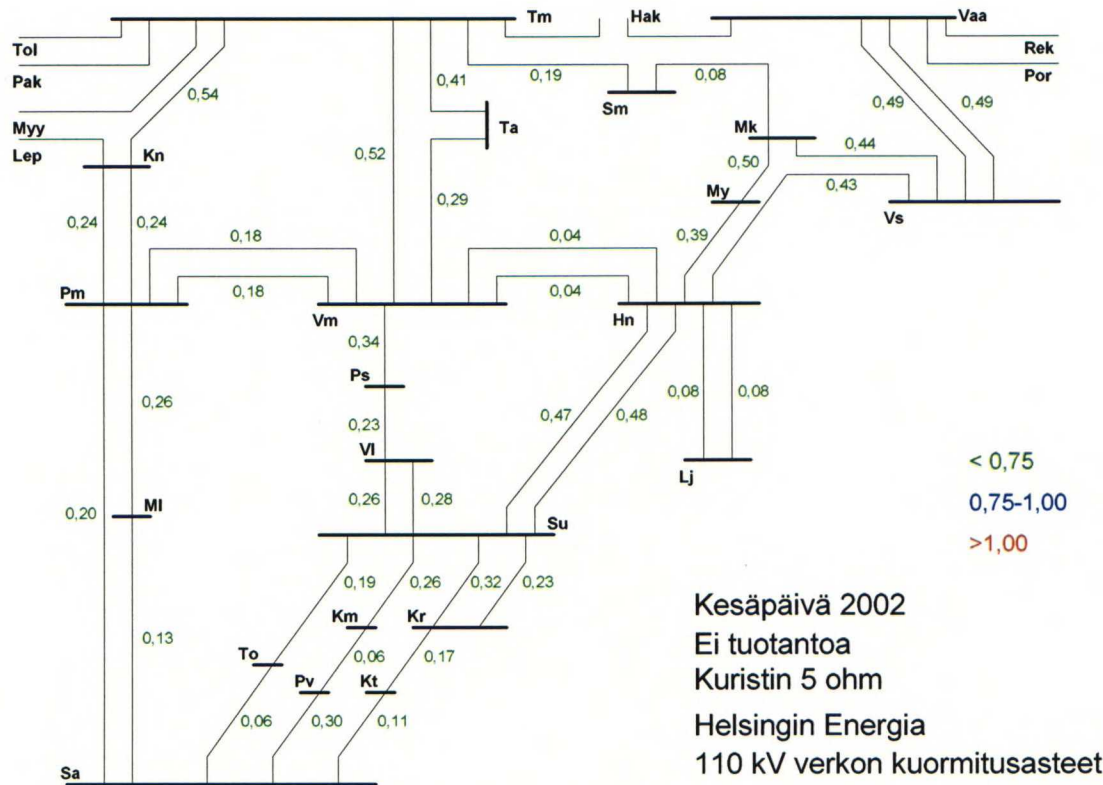
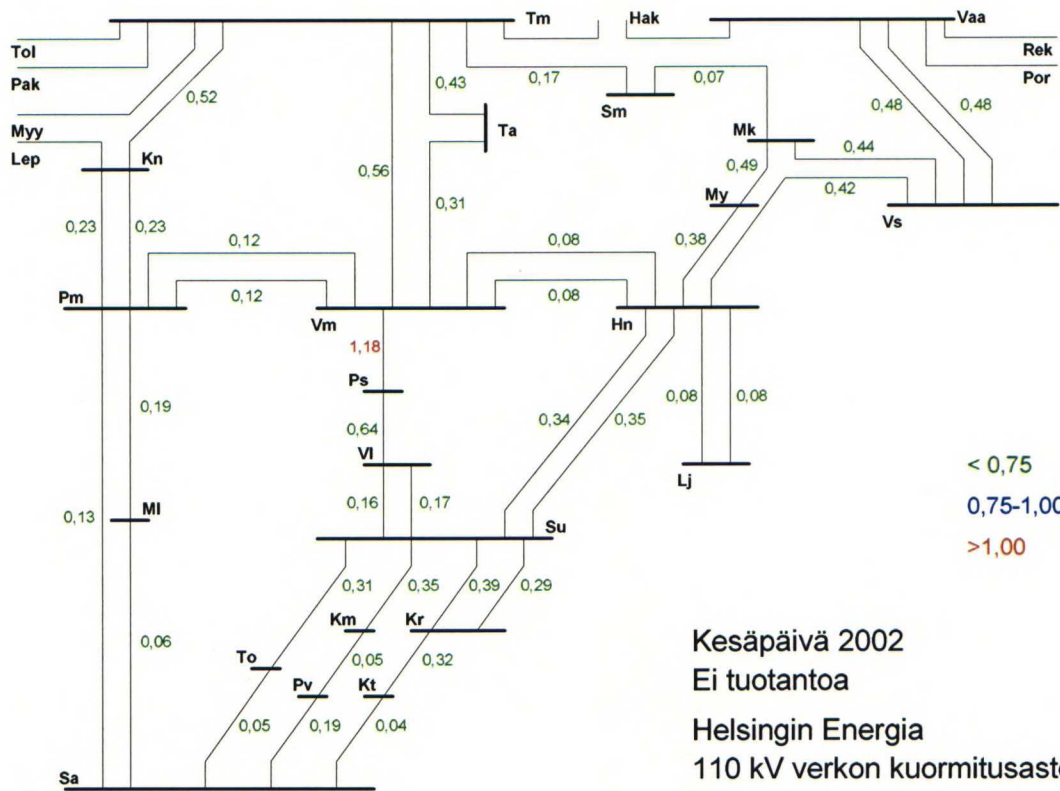
Kokonaisimpedanssiksi saadaan

$$Z = R_b + \frac{1}{2} R_k + \frac{cX_{kc}^2}{X_{kc}^2 - 2d \cdot X_{kc} + c^2 + d^2} + \left( X_b + X_R + \frac{1}{2} X_k + \frac{(d \cdot X_{kc} - c^2 - d^2) \cdot X_{kc}}{X_{kc}^2 - 2d \cdot X_{kc} + c^2 + d^2} \right) j$$

Liite 3

(1/7)

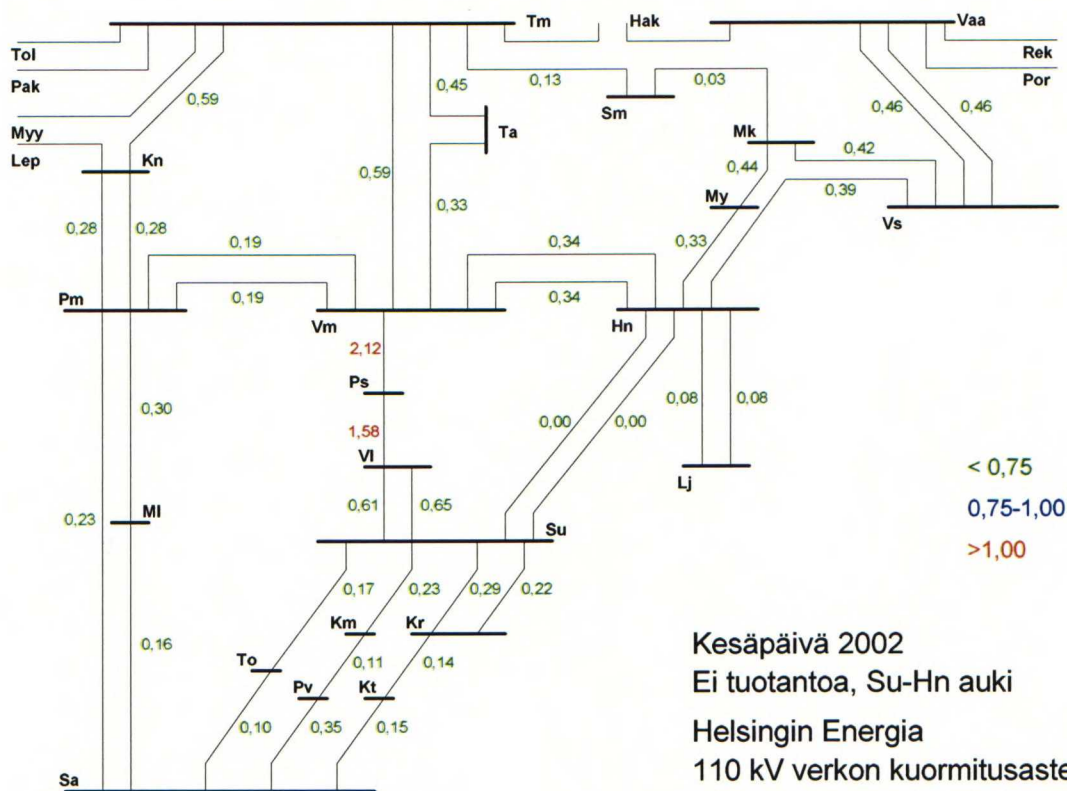
Verkon kuormituslaskennat



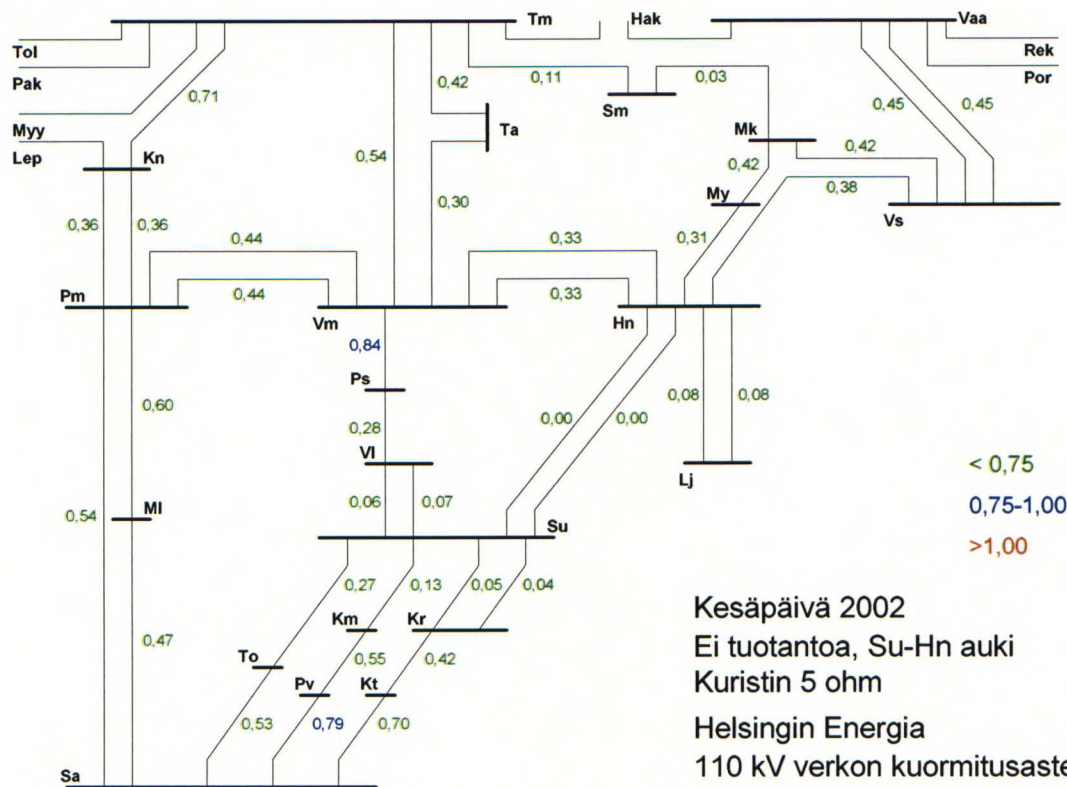


## Liite 3

(2/7)



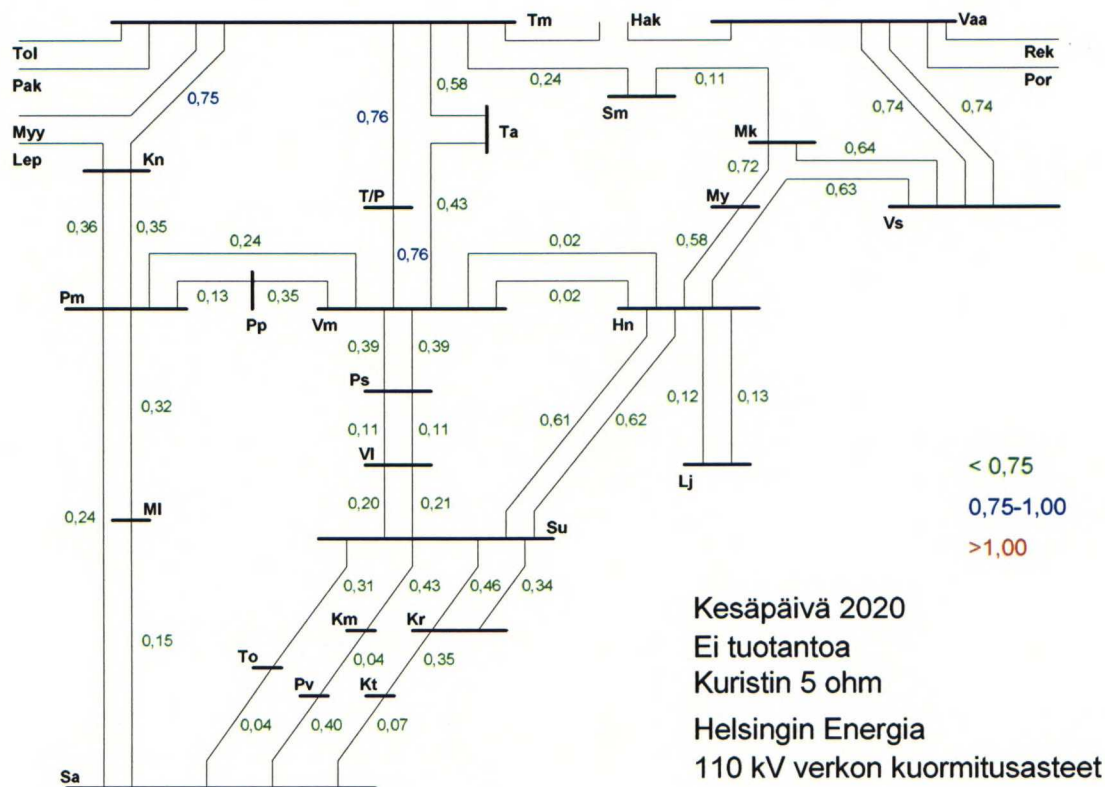
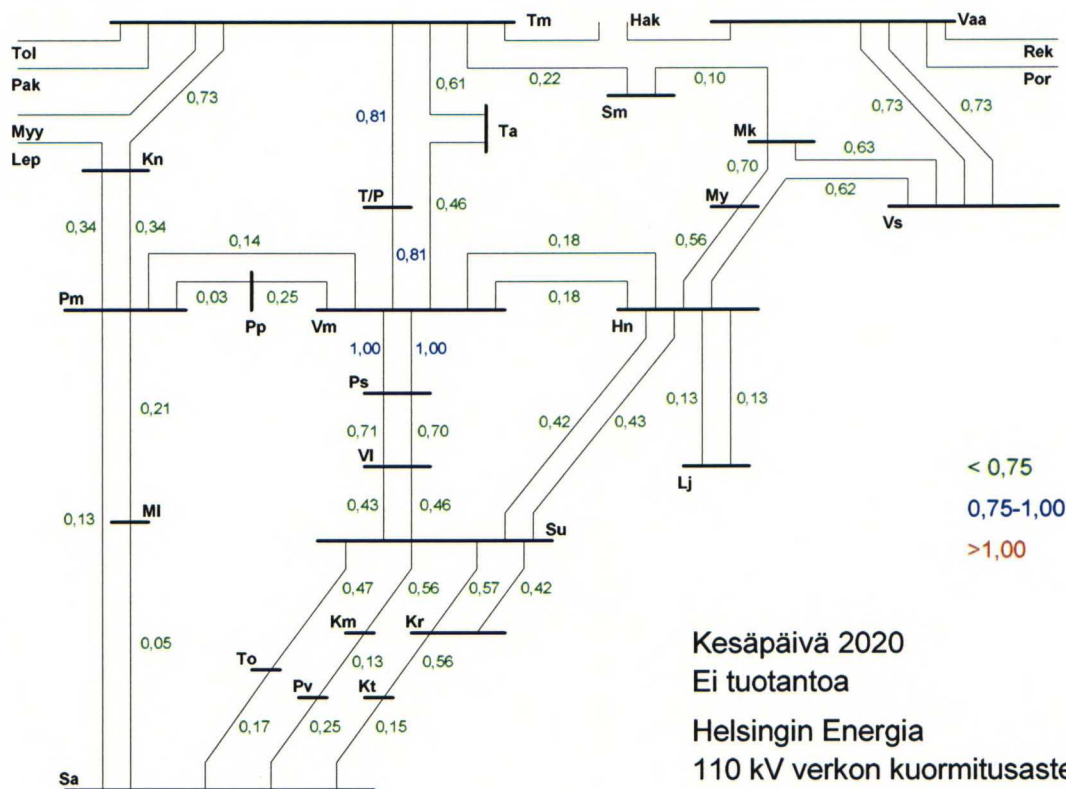
Kesäpäivä 2002  
Ei tuotantoa, Su-Hn auki  
Helsingin Energia  
110 kV verkon kuormitusasteet



Kesäpäivä 2002  
Ei tuotantoa, Su-Hn auki  
Kuristin 5 ohm  
Helsingin Energia  
110 kV verkon kuormitusasteet

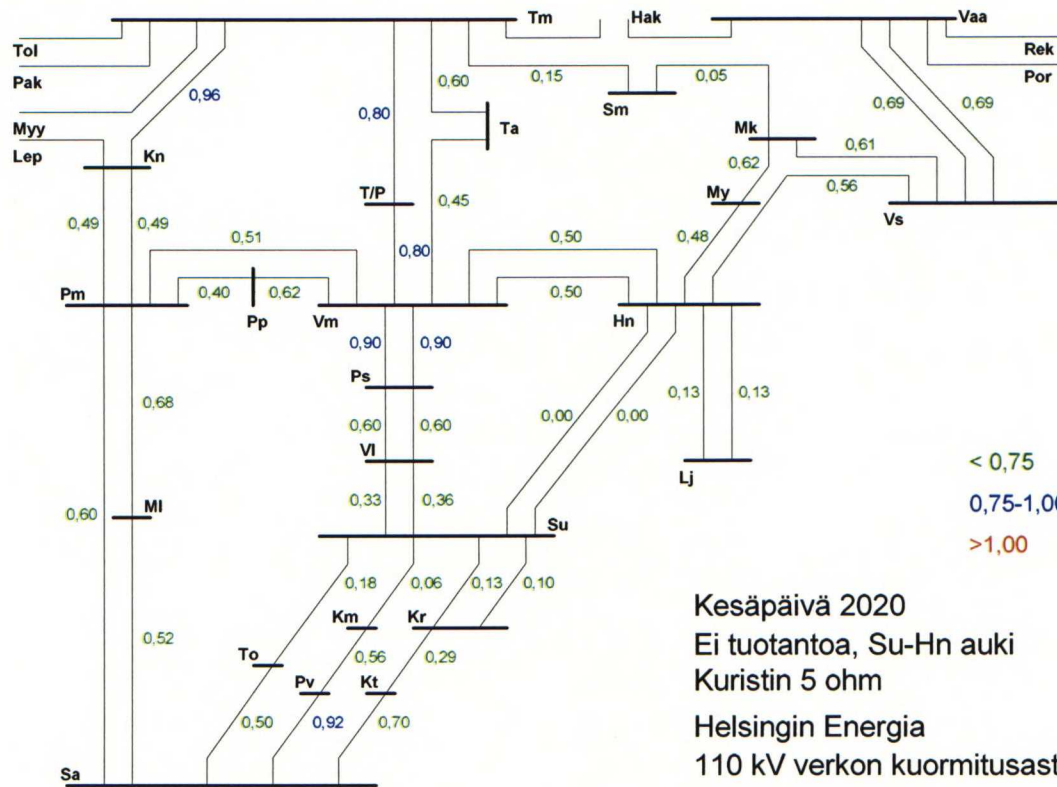
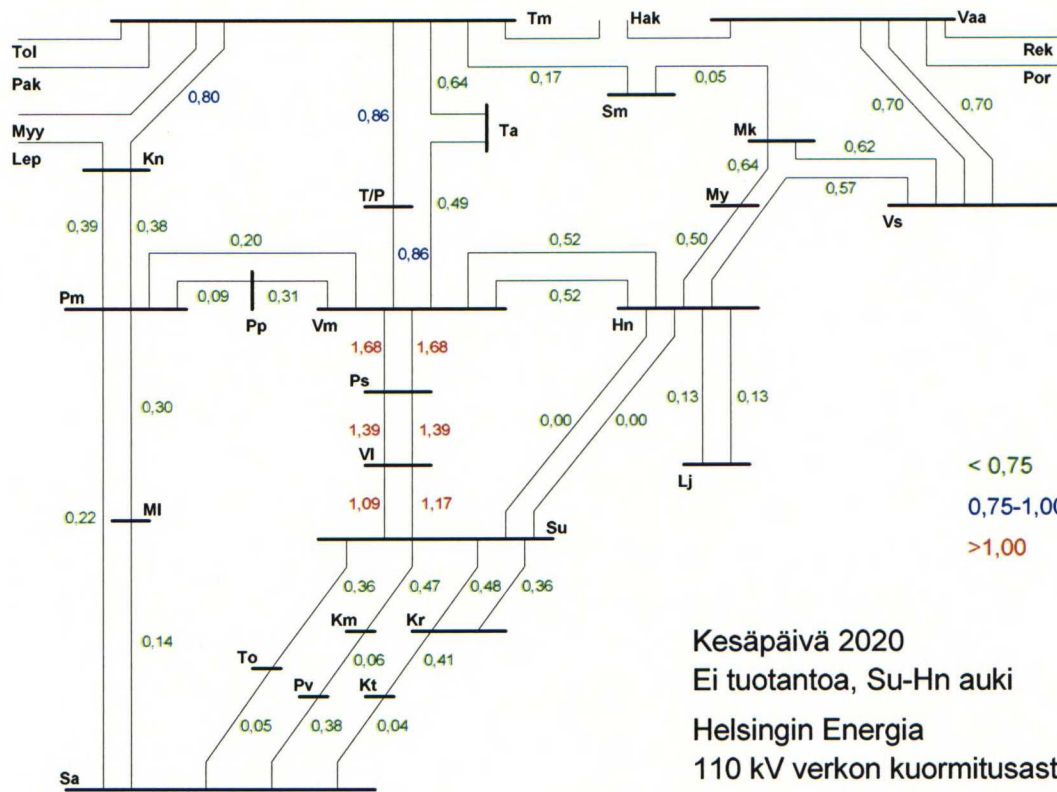
## Liite 3

(3/7)



Liite 3

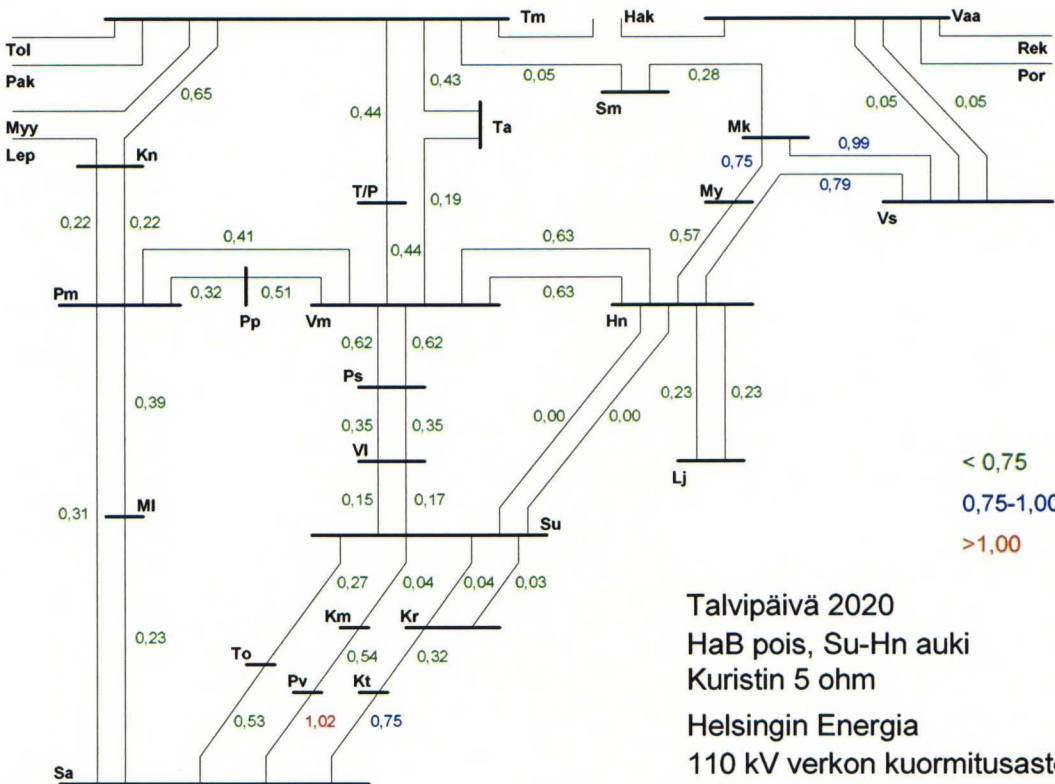
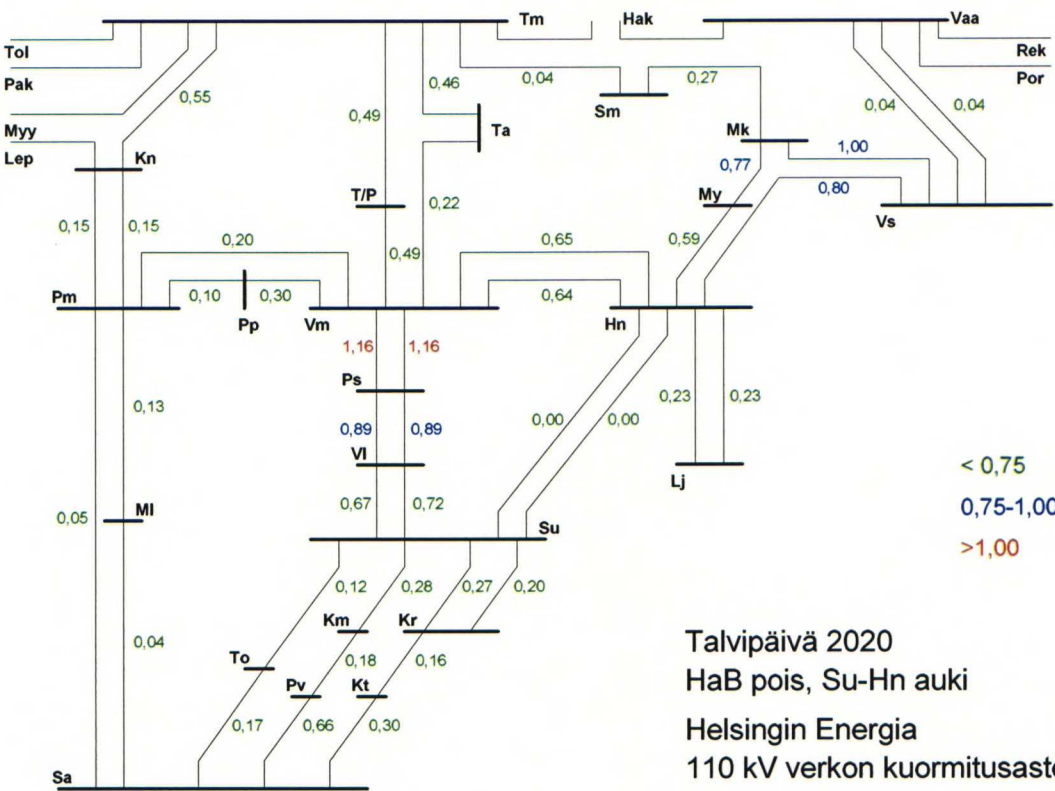
(4/7)





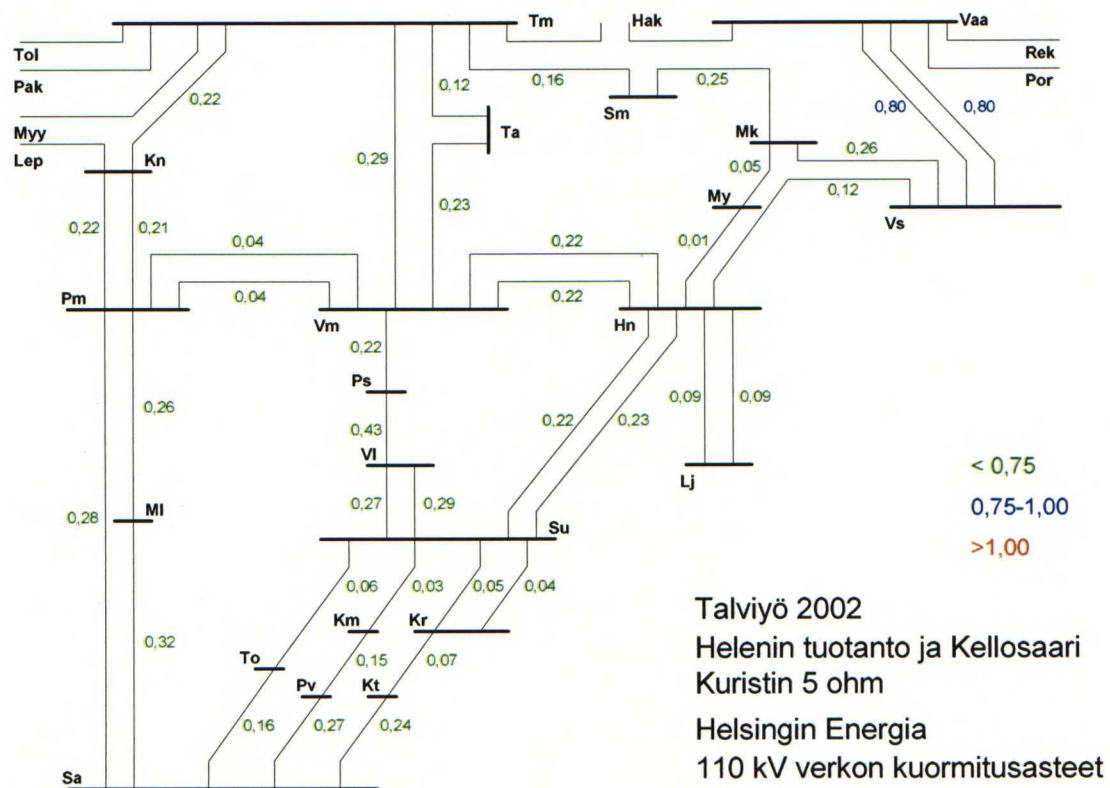
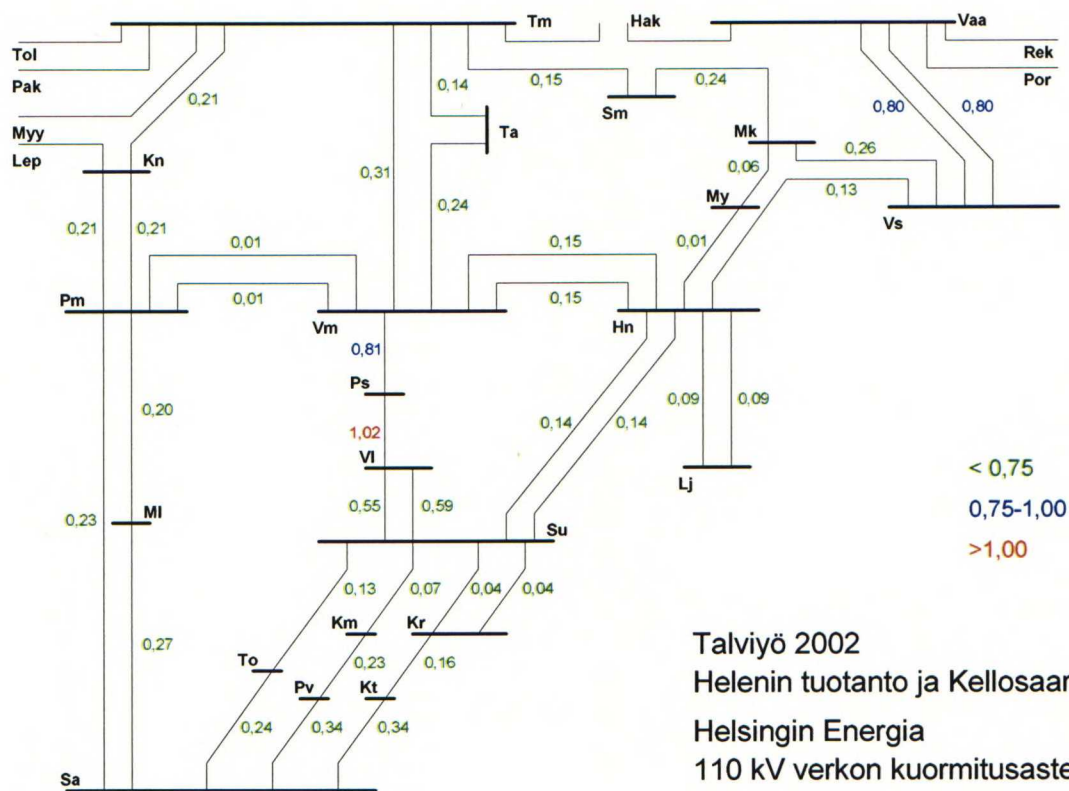
Liite 3

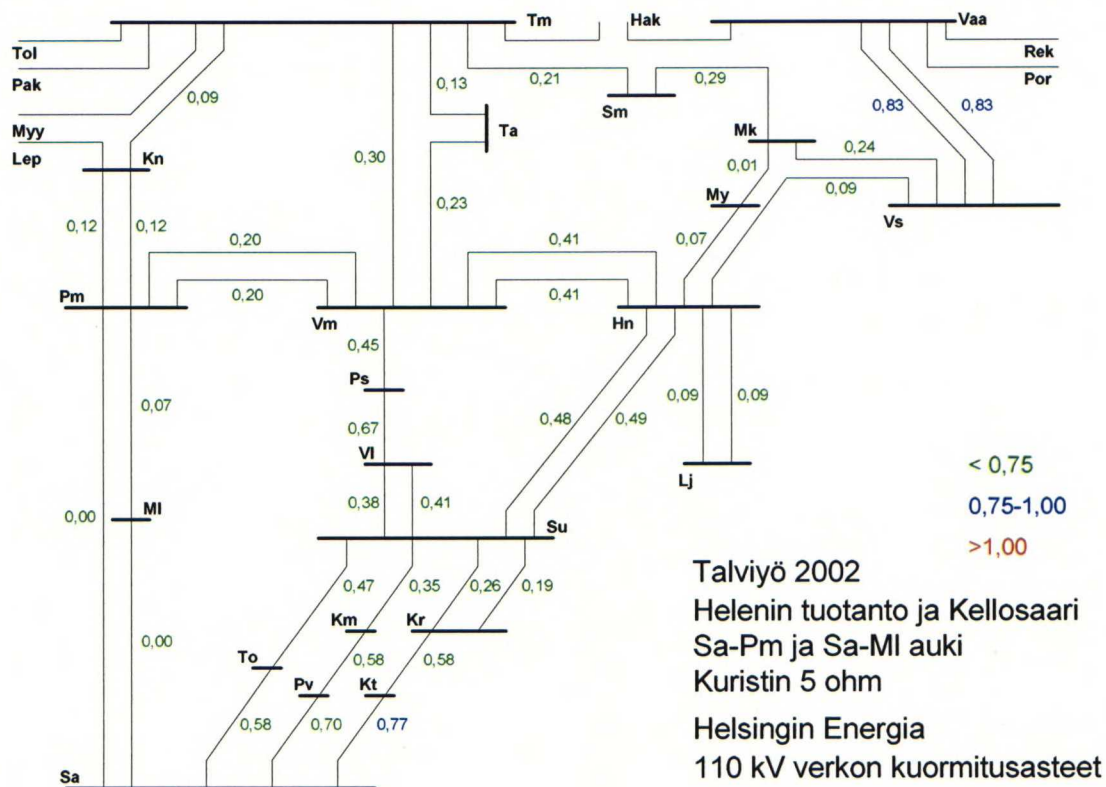
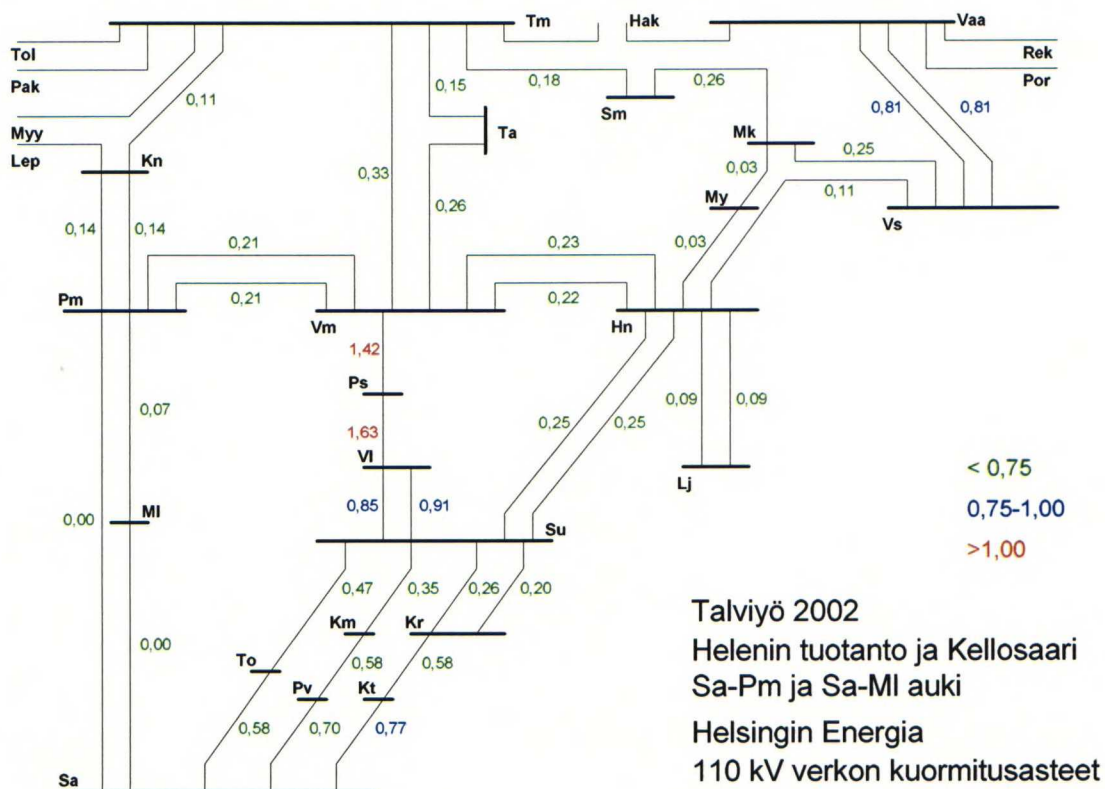
(5/7)



## Liite 3

(6/7)



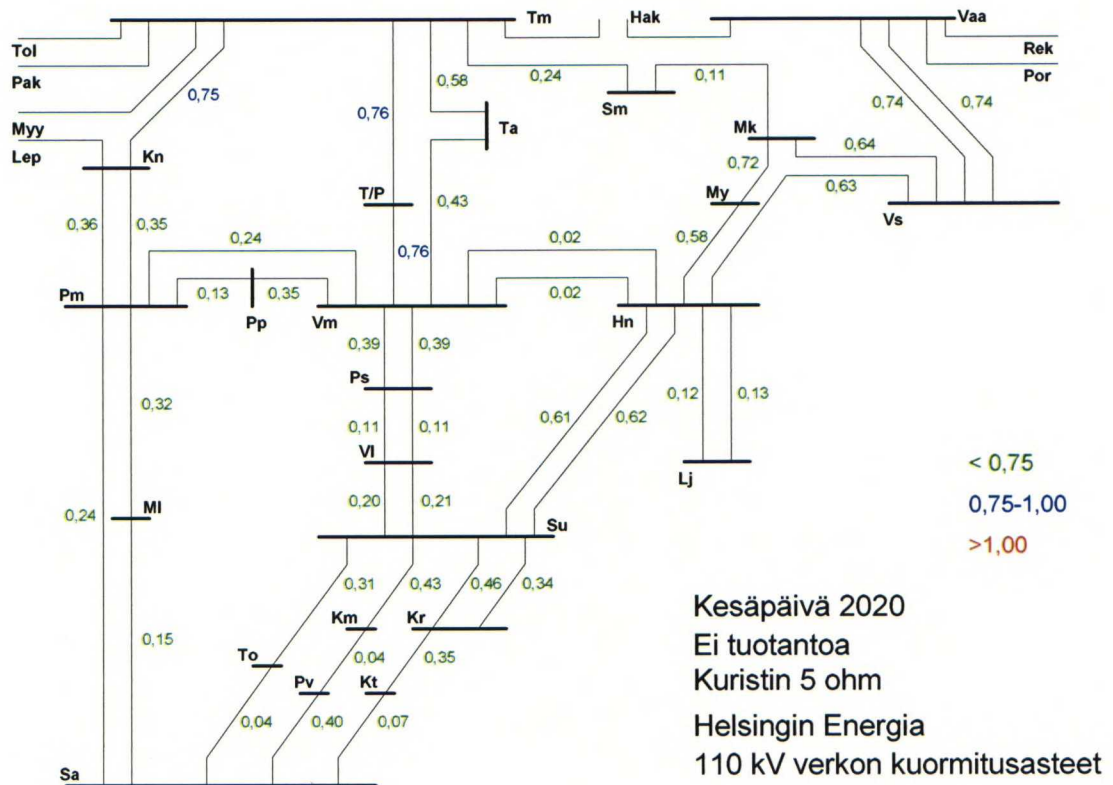
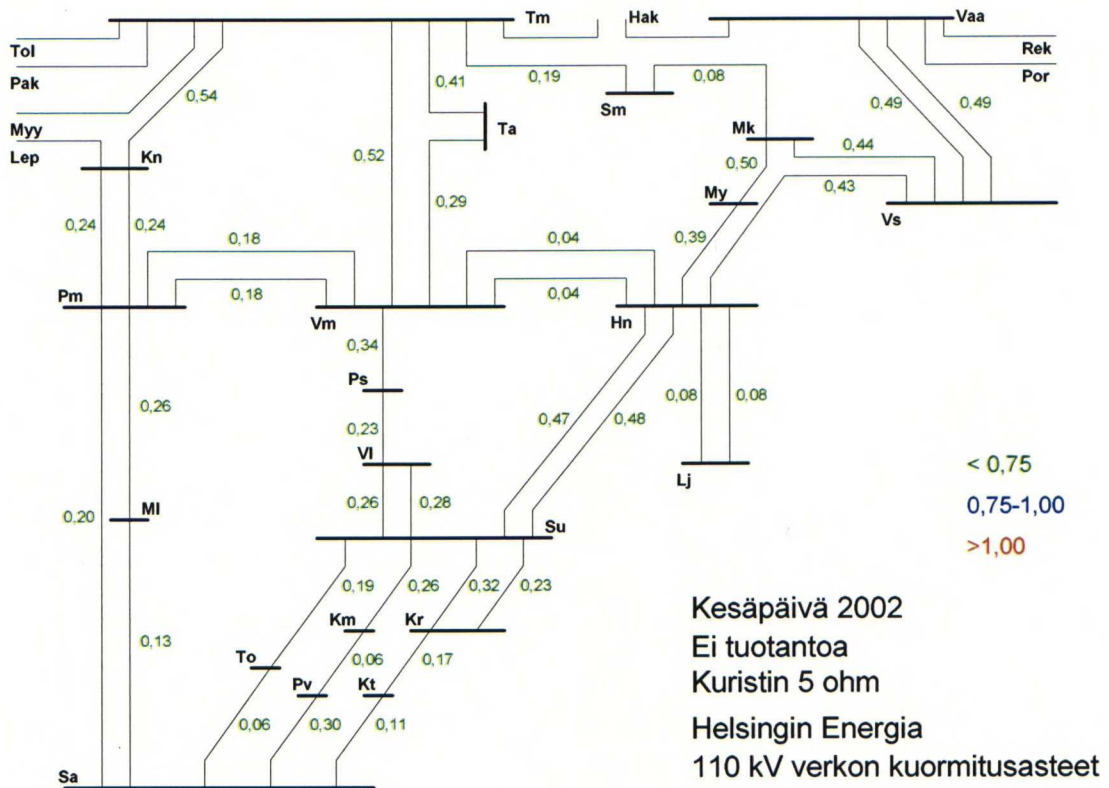




## Liite 4

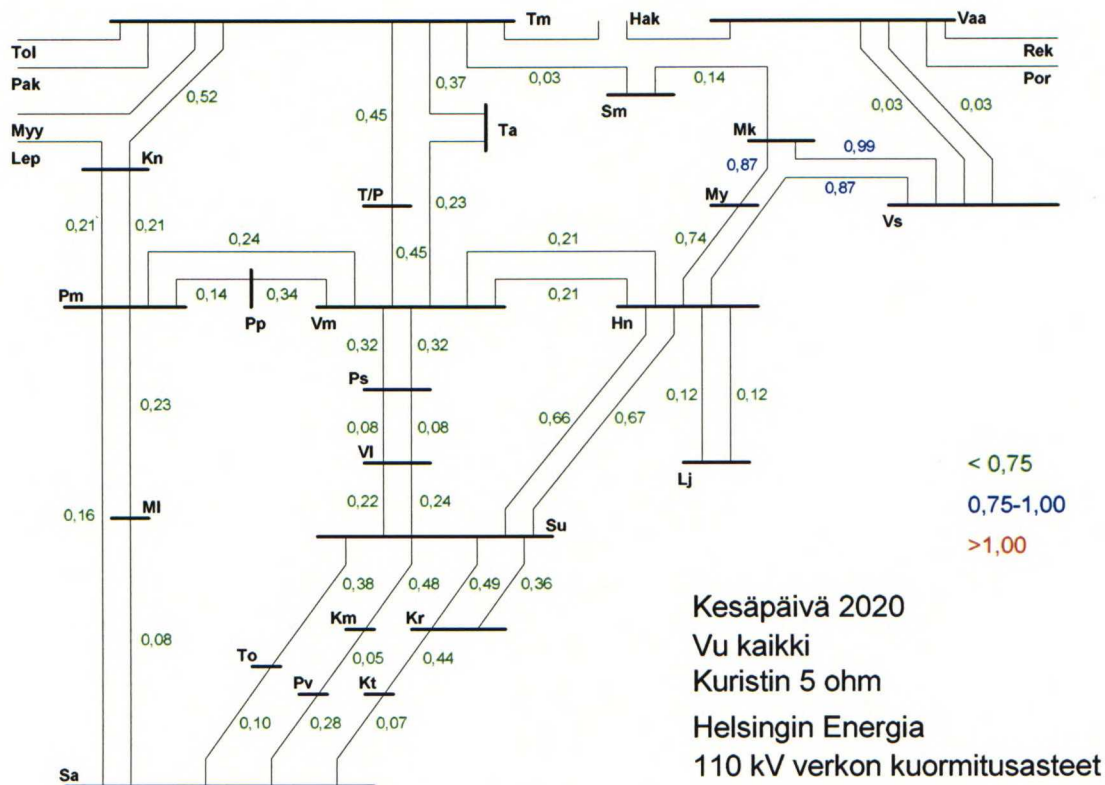
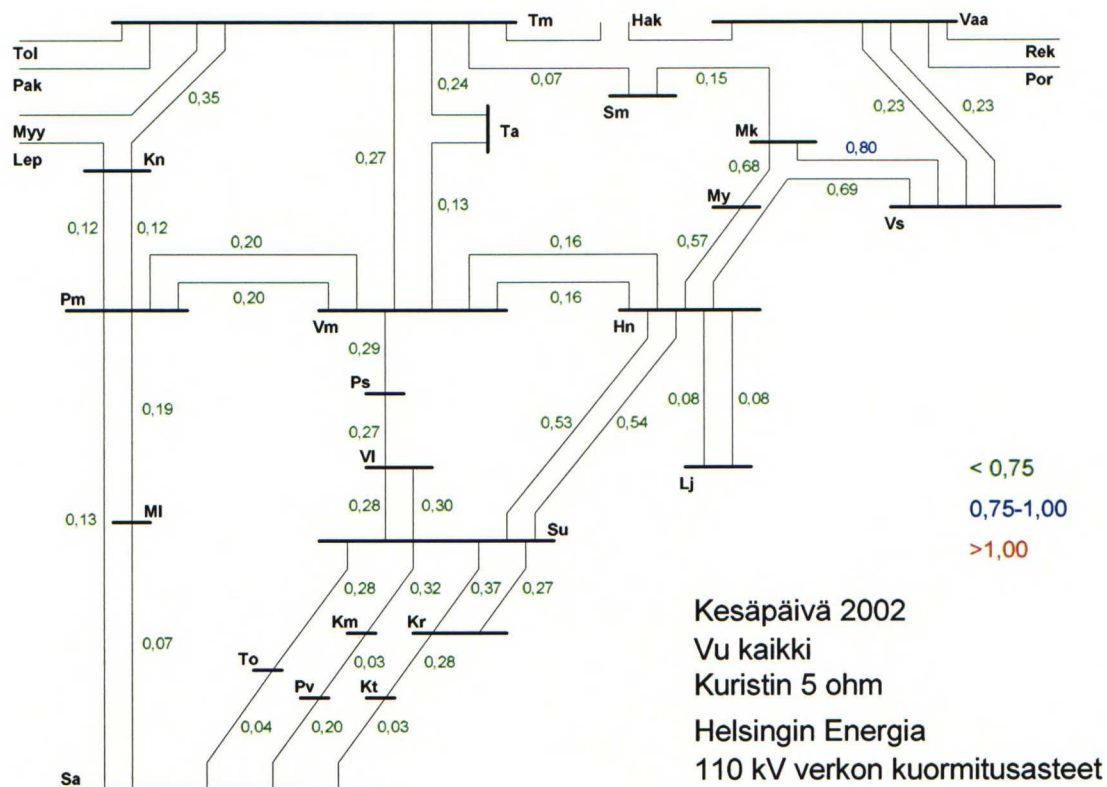
(1/9)

Verkon kuormituslaskennat viiden ohmin kuristimella



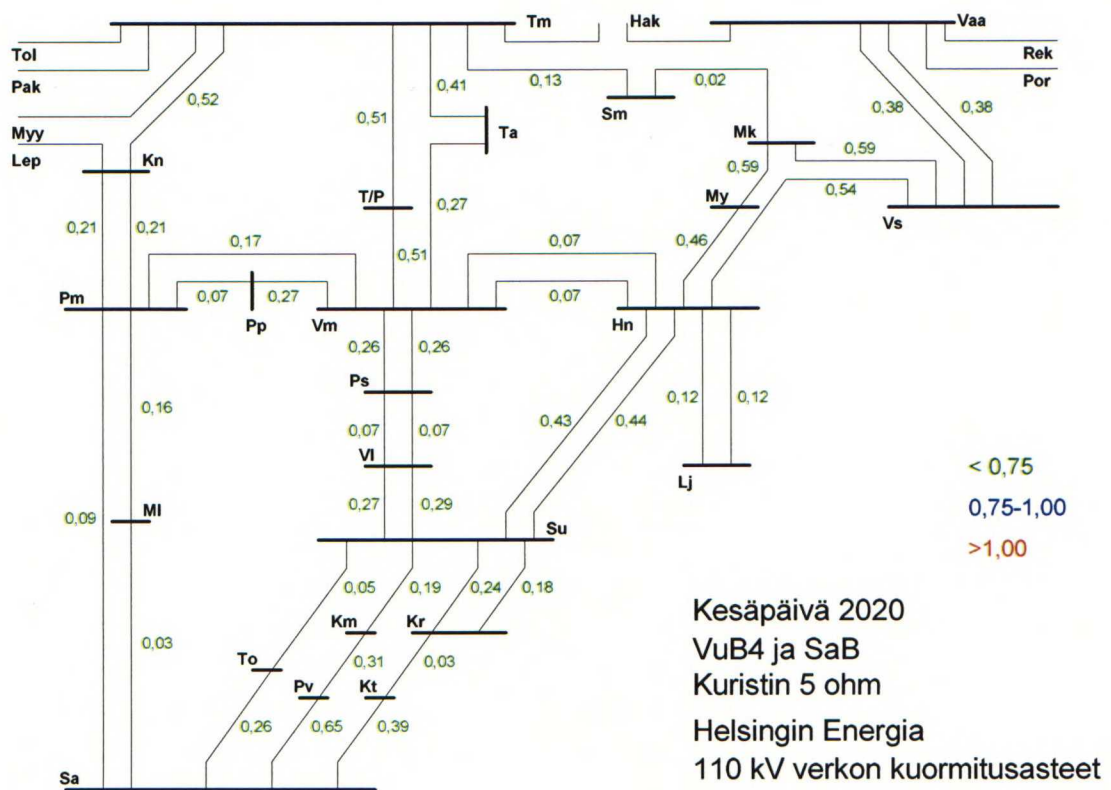
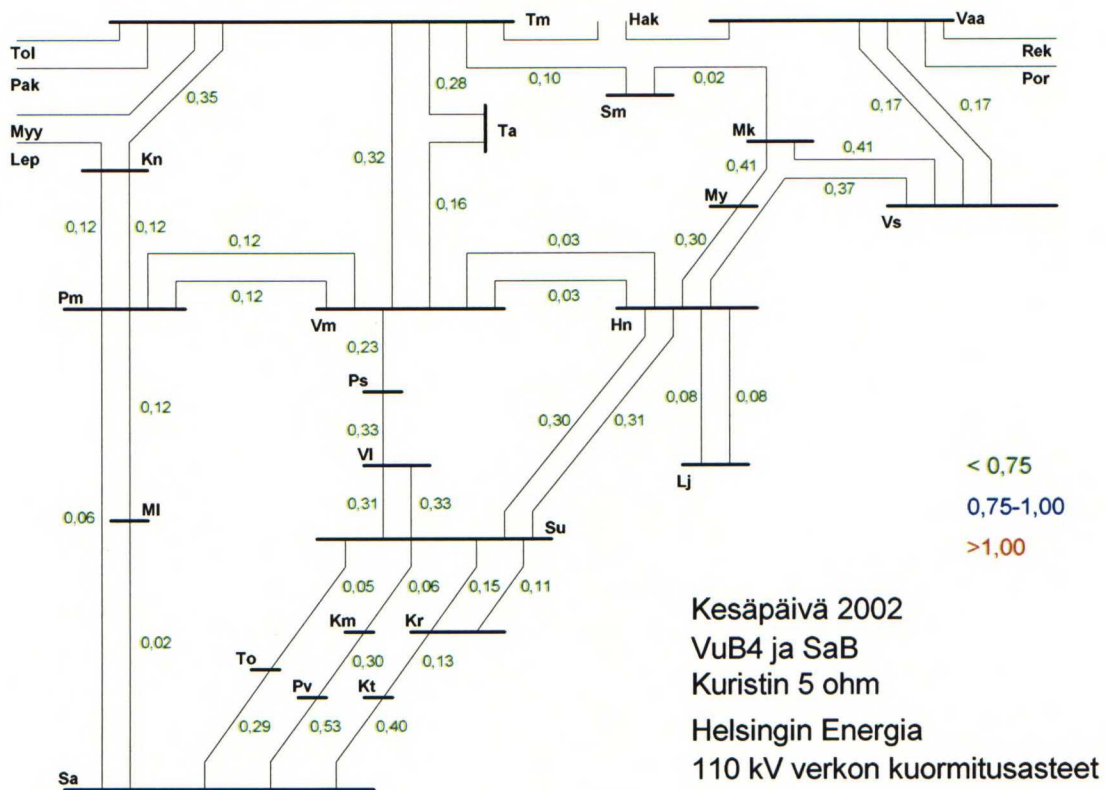
## Liite 4

(2/9)



## Liite 4

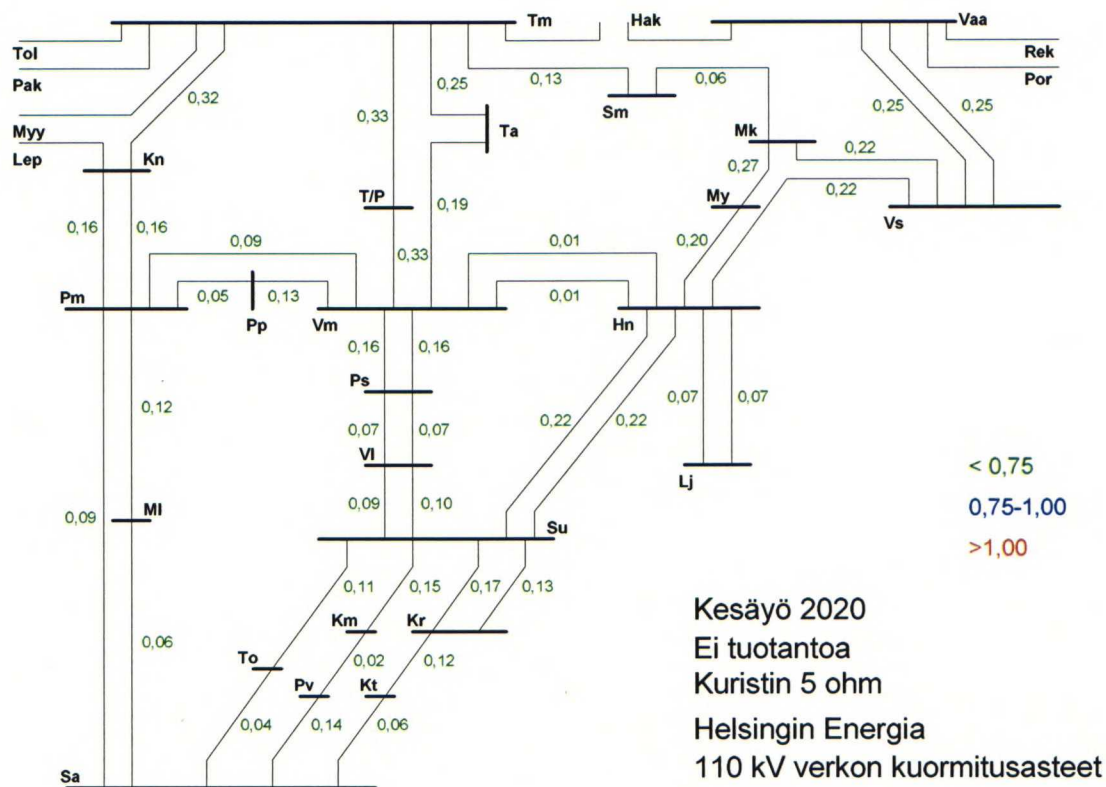
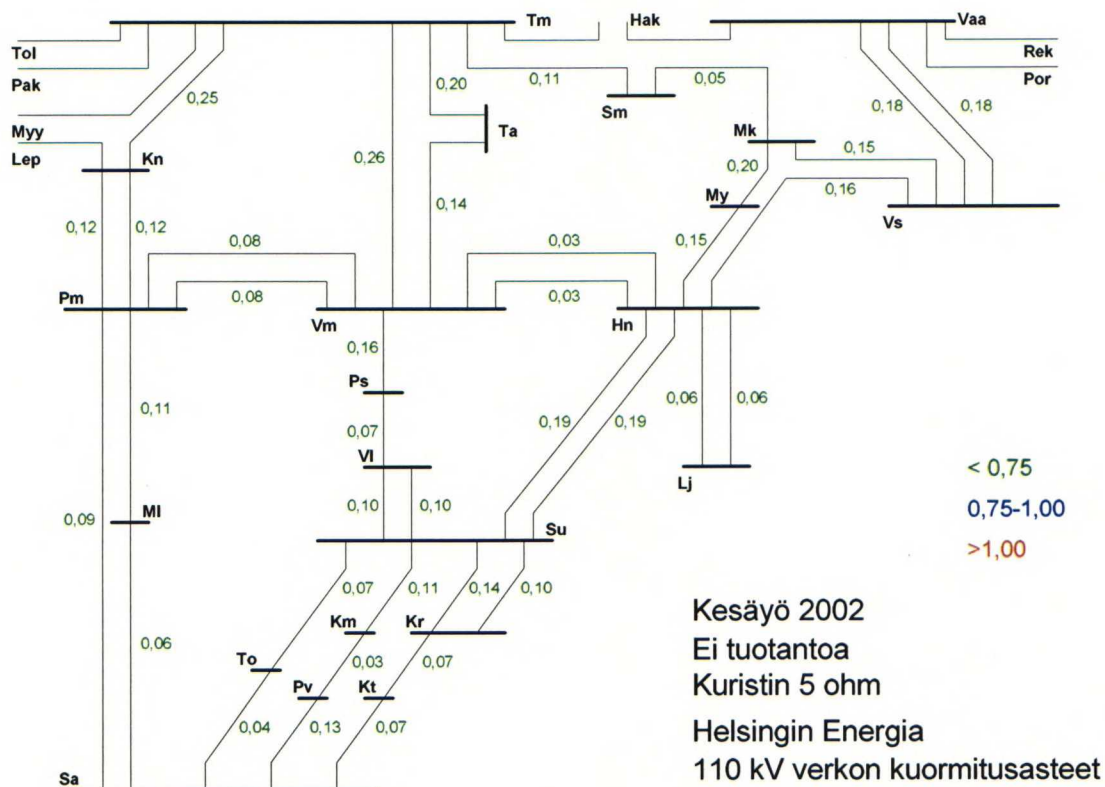
(3/9)





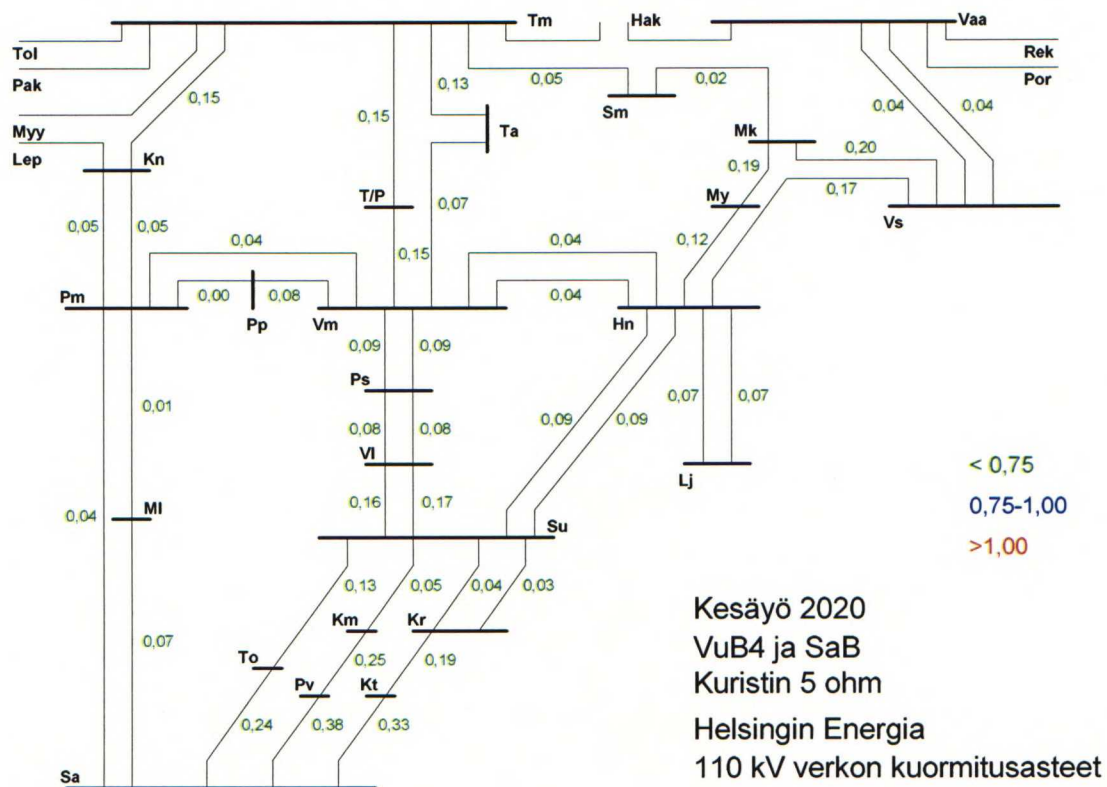
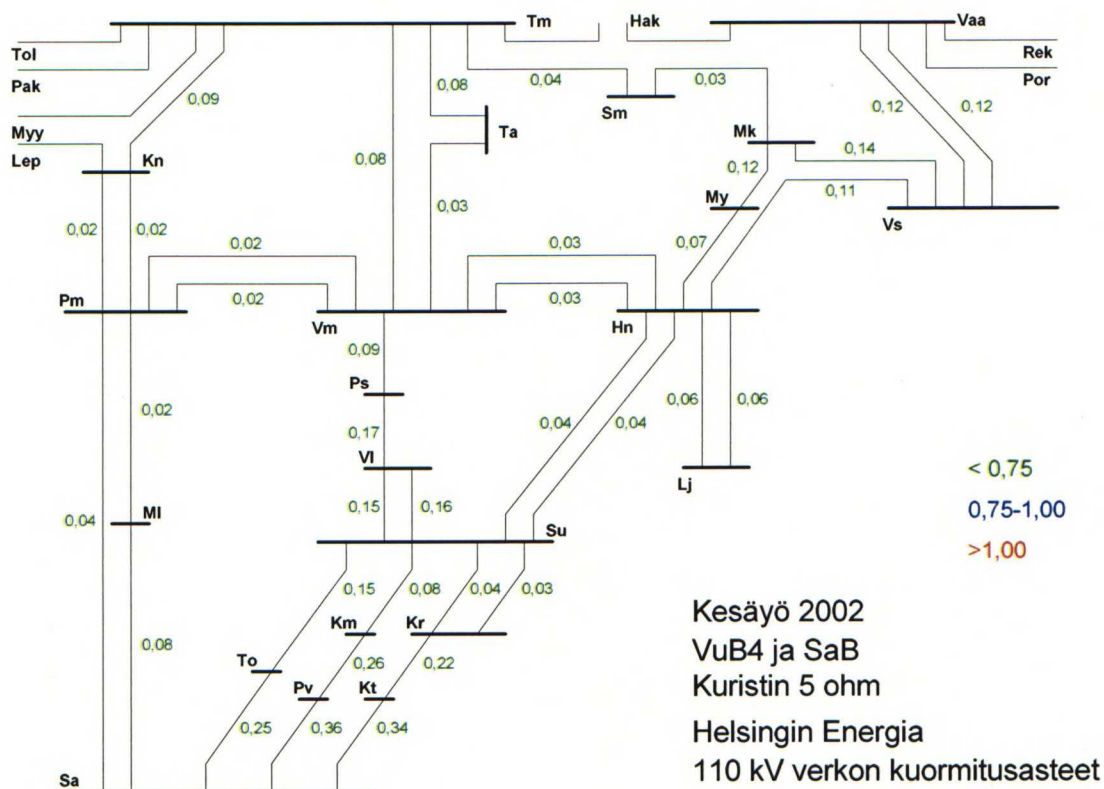
## Liite 4

(4/9)



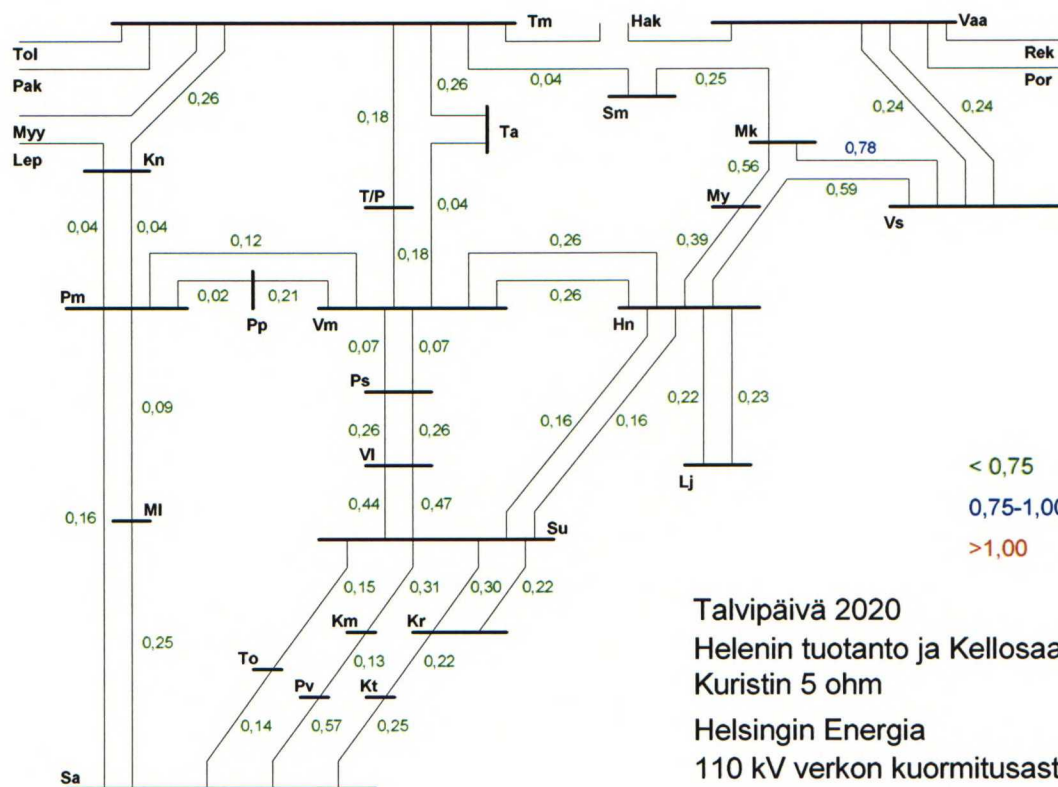
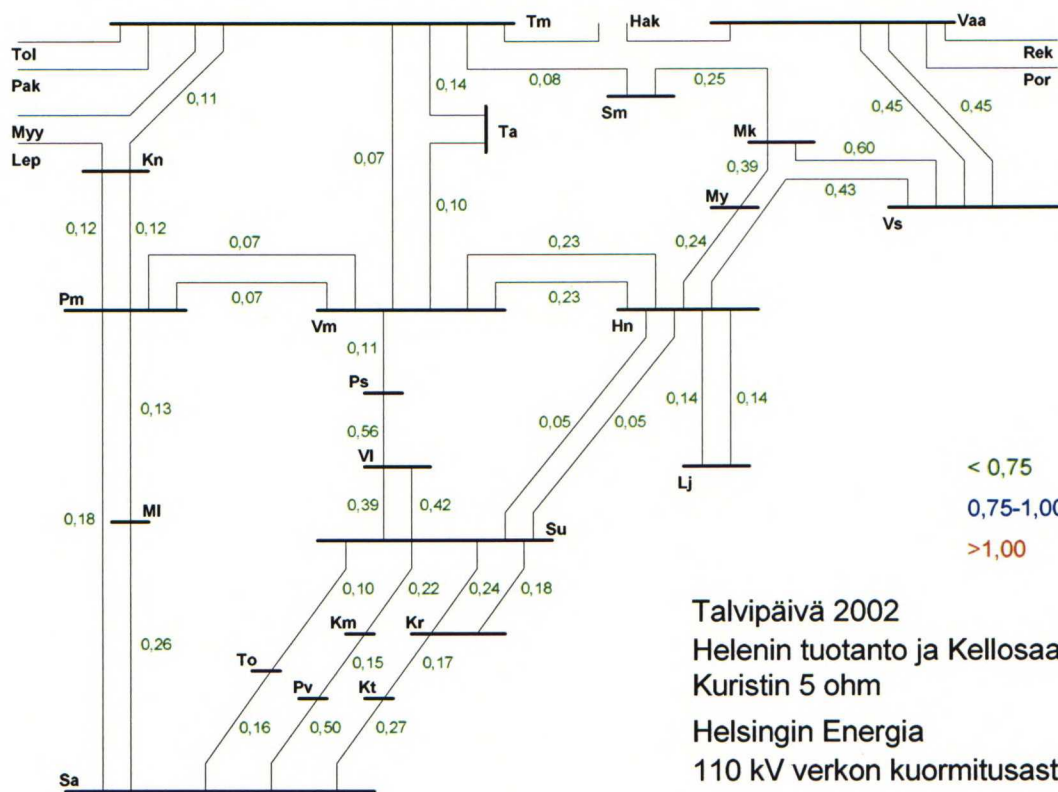
## Liite 4

(5/9)



## Liite 4

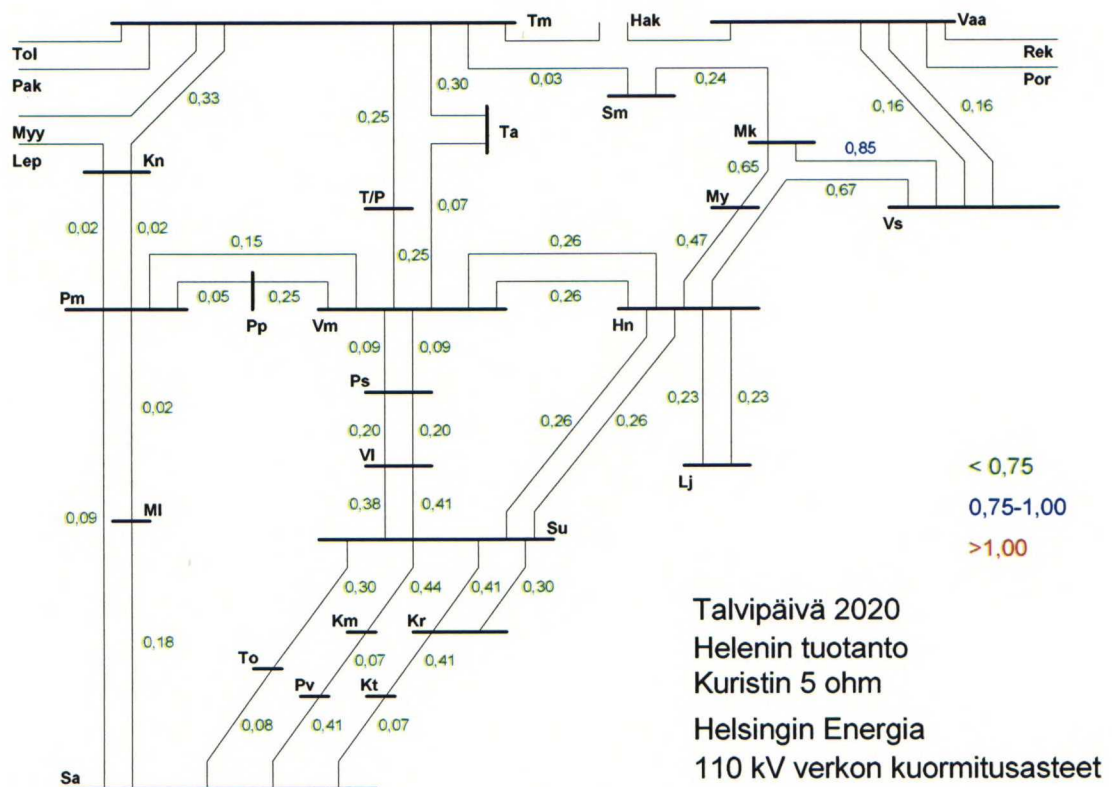
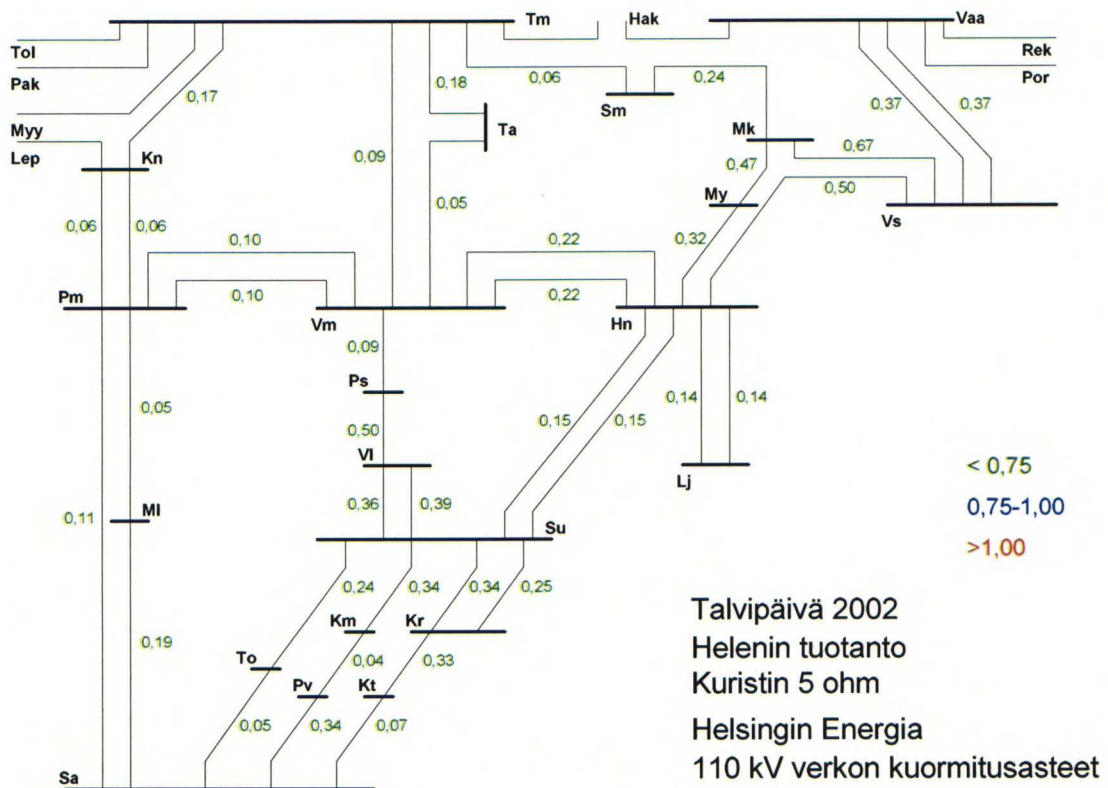
(6/9)





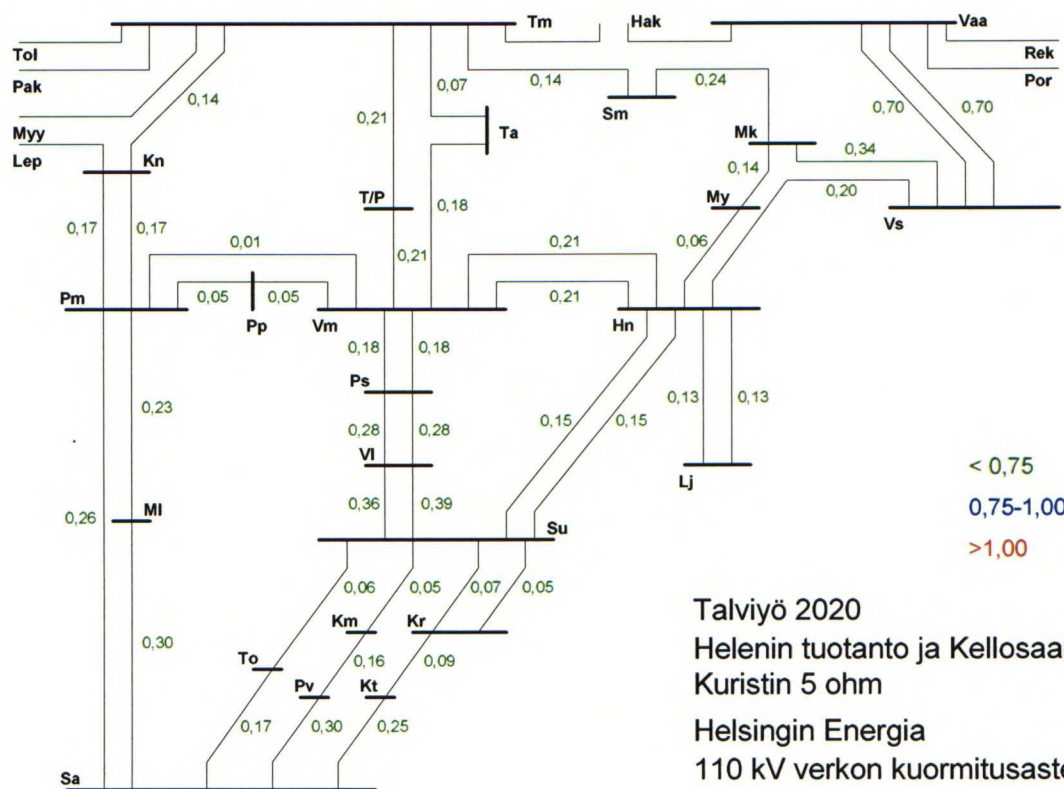
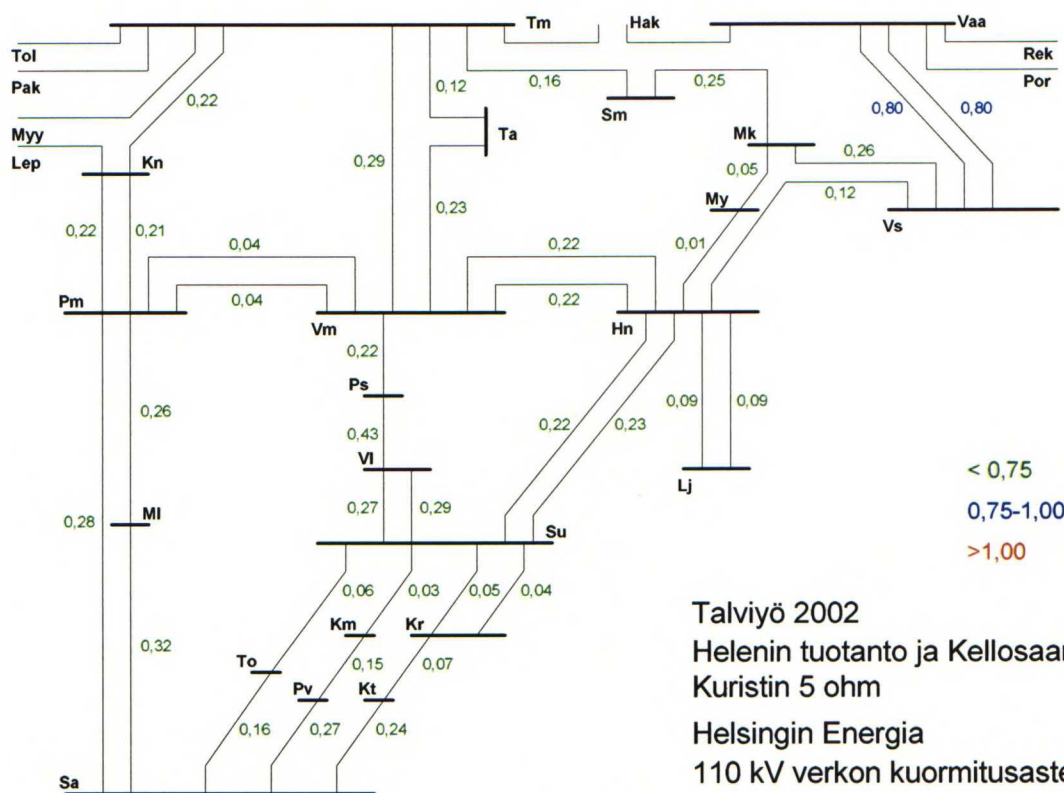
## Liite 4

(7/9)



## Liite 4

(8/9)



## Liite 4

(9/9)

